

Pferdeklinik der Vetsuisse-Fakultät Universität Zürich

Direktor: Prof. Dr. med. vet. Jörg A. Auer

Arbeit unter der Leitung von PD Dr. med. vet. Brigitte von Rechenberg

Muskuloskeletal-Research-Unit (MSRU)

Osteotomie: Der Einfluss des Sägeblattes auf die Knochenheilung

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde

der Vetsuisse Fakultät

Universität Zürich

vorgelegt von

Alessa Waibel

Tierärztin

aus Bussnang (Schweiz)

Genehmigt auf Antrag von

PD Dr. med. vet. Brigitte von Rechenberg, Referentin

Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Dr. med. habil. Robert Sader, Korreferent

Zürich 2005

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	4
Zusammenfassung	5
1 Einleitung	7
2 Literatur	9
2.1 Frakturheilung	9
2.2 Methoden und Techniken der Osteotomie	14
2.3 Oszillierende Säge	16
2.3.1 Technik und Geometrie	16
2.3.2 Wärmeentwicklung	19
3 Material und Methoden	22
3.1 Aufbau der Studie	22
3.2 Daten der beiden Sägeblätter	23
3.3 Versuchstiere	24
3.4 Vorbereitung der Versuchstiere	24
3.5 Operation	25
3.6 Weiterer Verlauf	28
3.7 Probenaufbereitung und –auswertung	29
3.7.1 Gewinnung und Aufbereitung der Proben	29
3.7.2 Untersuchungsmethoden	31
4 Resultate	36
4.1 Operation	36
4.2 Postoperative Phase	36
4.3 Schlachtung und makroskopische Befunde	37
4.4 Radiologische Befunde	38
4.5 Histomorphometrie	42
4.6 Semiquantitative Resultate der Histologien	44

4.7	Qualitative Histologie	52
4.8	Korrelationen.....	53
5	Diskussion	55
5.1	Versuchsmodell	55
5.2	Operation und weiterer Verlauf	56
5.3	Probenaufbereitung und -auswertung.....	58
5.4	Radiologie	59
5.5	Histologie	59
5.6	Korrelationen.....	61
5.7	Statistik	62
5.8	Schlussbeurteilung.....	62
5.9	Zukunfts-Perspektiven	63
6	Abbildungen.....	64
6.1	Operation	64
6.2	Radiologie und Makroskopie.....	64
6.3	Histologie	67
7	Literaturverzeichnis.....	70
8	Tabellenverzeichnis.....	73
9	Abbildungsverzeichnis	74
10	Danksagung	77
11	Lebenslauf.....	78

Abkürzungsverzeichnis

Abspr.po	Absprengungen postoperativ
Ap	Apposition
BM	Bone marrow, Knochenmark
endost.K	endostaler Kallus
FC	Far Cortex, plattenferner Cortex
Fxspalt	Osteotomiespalt
g	green, grün
gap	Spalt
gaph	Gap healing, Spaltheilung
i.m.	intramuskulär
I.U.	Internationale Einheiten
i.v.	intravenös
NC	Near Cortex, plattennaher Cortex
o	orange
p.K.	periostaler Kallus
p.o.	per os
postop	postoperationem
Rem	Remodeling
Repos.po	Reposition postoperativ
Rest	Restauration
s.c.	subcutan
Schr	Schrauben
V	Verhältnis
w, wks	Wochen
y	yellow, gelb

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss des Sägeblattes auf die Knochenheilung nach einer Osteotomie mittels oszillierender Säge untersucht. An 24 Schafen wurde eine Tibiaosteotomie vorgenommen, wobei bei der Hälfte der Tiere als Kontrollgruppe ein konventionelles geschränktes Synthes-Sägeblatt und bei der anderen Hälfte ein neues Spezialsägeblatt verwendet wurde. Nach Refixation der Osteotomie mit 3.5 mm breiten Dynamischen Kompressionsplatten (DCP) wurde den Schafen Fluorochrommarker injiziert und sie wurden zur Kontrolle geröntgt. Nach 4 und nach 12 Wochen wurden je 12 Schafe geschlachtet und die entnommenen Knochenproben einer makroskopischen, radiologischen, histologischen und histomorphometrischen Untersuchung unterzogen.

Alle Operationen konnten wie geplant durchgeführt werden und die postoperative Phase verlief weitgehend komplikationslos.

Bei den nach 4 Wochen geschlachteten Schafen ergaben sich zwischen den beiden Sägeblättern bezüglich der Knochenheilung keine wesentlichen Unterschiede. Bei allen war der Osteotomiespalt sowohl radiologisch als auch makroskopisch noch deutlich sichtbar und es konnten weder Anzeichen für Gap healing noch Remodeling an den Osteotomieenden festgestellt werden.

Bei den nach 12 Wochen geschlachteten Tieren zeigte die Spezialsägegruppe eine tendenziell weiter fortgeschrittene Knochenheilung auf als die Kontrollgruppe. Radiologisch und makroskopisch war die Osteotomielinie weniger gut sichtbar und weniger periostaler Kallus war vorhanden als bei der Kontrollgruppe. Histomorphometrisch wurde mehr neues, vitales Gewebe nachgewiesen und der zuletzt gespritzte Fluoreszenzfarbstoff wurde vermehrt in den Knochen eingebaut. Bei der Kontrollsägegruppe war jedoch die Restauration der Knochenmarkhöhle weiter fortgeschritten und im plattenfernen Cortex wurde vermehrt Remodeling festgestellt. Die Daten lassen die Schlussfolgerung zu, dass sich beide Sägeblätter für eine Osteotomie eignen, aber beim Spezialsägeblatt tendenziell nach 3 Monaten eine verbesserte Frakturheilung vorhanden war, vor allem, was den Durchbau der beiden Osteotomieenden betraf. Die verbesserte Heilung des Knochens mit den Spezialsägeblättern wurde der schonenderen Sägetechnik zugeschrieben.

Summary

The aim of this study was to evaluate the influence of the sawblades on bone healing after osteotomy using an oscillating saw. Twenty-four sheep received a tibial osteotomy. Twelve had the procedure performed with a conventional sawblade with offset teeth, while a new special blade with wider aligned teeth was used for the others. After refixation of the complete osteotomy with a 3.5 mm wide compression-plate, the sheep were injected with fluorochrommarkers and radiographed for control.

The sheep were sacrificed after 4 and 12 weeks respectively and bone samples were examined macroscopically, radiographically, histologically using semiquantitative score systems and objective evaluation techniques such as histomorphometry.

All surgeries were performed without complications and no major postoperative complications occurred.

In the 4 week group there were no differences found between the two different sawblades. The osteotomy gap was visible radiographically and macroscopically in all 12 sheep and there was no evidence of gap healing or remodeling at the osteotomy ends.

In the 12 week group those sheep receiving osteotomy with the special saw blade showed better bone healing than the control group. The osteotomy gap was less visible and there was less periosteal callus macroscopically and radiographically than in the control group. Histomorphometrically there was more new vital tissue and the last injected fluorescent dye marker was better integrated into the bone. The restoration of the bone marrow space was more advanced and remodeling in the far cortex was more often observed in the control group.

In conclusion, both sawblades can be used for osteotomy, but the special sawblade shows better bone healing after 12 weeks, particularly in bridging of the osteotomy gap.

1 Einleitung

In der Chirurgie des Bewegungsapparates ist die Technik der Osteotomie (Knochendurchtrennung) seit langer Zeit etabliert und als Massnahme zur Korrektur von Fehlstellungen der Gliedmassen oder Abtrennen der Gelenkenden vor Einsetzen einer Prothese nicht mehr wegzudenken. Während früher vor allem Handinstrumente (Meissel und Hammer) hierfür verwendet wurden, werden heute fast ausschliesslich Sägeinstrumente mit speziellen Schnittblättern verwendet. Als Vorlage für diese Sägeblätter dürften in den meisten Fällen diejenigen der Holz- oder Plastikverarbeitungsindustrie gedient haben. Als Antrieb für die Knochensägen werden heute sehr häufig oszillierende Maschinen verwendet, die mit Druckluft oder Elektrizität angetrieben werden. Zur Verfügung stehen heute zur Knochenbearbeitung verschiedenste Längen und Dicken von Sägeblättern, die aus unterschiedlichen Materialien hergestellt sind. Aus der spanabhebenden Industrie ist bekannt, dass übermässige Wärmeentwicklung beim Schnittvorgang zu Problemen im Bearbeitungsgut führt. Dies ist bei vitalem Gewebe, wie zum Beispiel dem Knochen, nicht anders und äussert sich hier in Form von abgestorbenem Knochengewebe, welches später die Heilung verzögert. Zur Vermeidung von Wärmeentwicklung beim Schneidevorgang wird in der Medizin meist sterile Kochsalz- oder Ringerlösung zur Kühlung der Schnittfläche verwendet.

Während in der Industrie die negativen Effekte bei der spanenden Bearbeitung sehr eingehend erforscht und mit viel Aufwand vermieden werden, ist dies bei der Bearbeitung von Knochengewebe noch nicht in gleichem Masse erfolgt. In Vivo-Untersuchungen zur Erfassung der Reibungswärme, der Entstehung von Knochennekrosen oder anderen negativen Nebeneffekten sind nur selten durchgeführt worden. Wesentlich ist auch bei einem Knochen- Sägeblatt, dass die Schnitfführung exakt und mit wenig Substanzverlust erfolgen kann. Im Übrigen soll das Sägeblatt nur die gewünschten, harten Knochenstrukturen schneiden und die Weichteile der Umgebung möglichst intakt lassen. Dadurch kommt es viel weniger zu Gefäss-, Nerven- oder Sehnenverletzungen. Diese Charakteristik wird besonders dort gefordert, wo die Schnitt-, respektive die Operationsverhältnisse eng sind und die anliegenden Weichteile nur ungenügend geschützt werden können. Die heute verwendeten

sogenannten modernen Sägeblätter zeigen oftmals ein geschränktes Zahnbild, was bedeutet, dass die Zähne des Sägeblattes abwechselungsweise nach der einen, beziehungsweise der anderen Seite des Blattes abgewinkelt sind. Dadurch wird eine gewisse Verbreiterung des Schnittes erreicht, was die Entstehung von Reibung beim nachfolgenden Schaft des Sägeblattes reduziert. Bei diesem Bautyp kann mit den jetzigen Messmethoden die Art und Weise der Spanabhebung zwar vermutet, jedoch nicht in jedem Falle sicher eruiert werden. Hieraus resultiert auch eine gewisse Ungenauigkeit der Schnittführung.

Die vorliegende Untersuchungsserie sollte Klarheit schaffen, inwiefern ein Sägeblatt, welches durch seine spezielle Geometrie einen besseren Abtransport der Sägespäne erlaubt, die Entstehung von Nekrosen und anderen unerwünschten Einflüssen durch die spanabhebende Bearbeitung vermeiden oder zumindest reduzieren kann.

Es wurde erwartet, dass eine minimal traumatisierte Fläche seitlich des Osteotomie-schnittes durch Vermeidung der Nekrosebildung zu einem schnelleren Durchbau der Osteotomie führen würde.

2 Literatur

2.1 Frakturheilung

Die Besonderheit der Frakturheilung liegt darin, dass es sich nicht um eine Reparation handelt, welche eine bindegewebige Narbe zurücklässt, sondern um eine knöcherne Regeneration [10, 15]. Das verletzte Gewebe ist nach Abschluss der Heilungsvorgänge durch neu gebildeten Knochen ersetzt, sodass meist keine Anzeichen der ursprünglichen Fraktur zu erkennen sind.

Die Ossifikation erfolgt durch Osteoblasten, die sich aus undifferenzierten mesenchymalen Zellen oder aus Fibroblasten entwickeln können. Man unterscheidet die enchondrale von der desmalen Ossifikation.

Die enchondrale Knochenbildung findet sich hauptsächlich an den Epiphysen der langen Röhrenknochen, an den Rippen, den Wirbelkörpern und an Teilen der Schädelbasis. Via Knorpelgewebe wird von den Osteoblasten und durch Mineralisation primäre Spongiosa gebildet, welche dann durch Umbau über lamellär geschichtete knorpelfreie Knochenbälkchen in sekundäre Spongiosa umgewandelt wird. Durch enchondrale Ossifikation erfolgt das Längenwachstum der Röhrenknochen.

Bei der desmalen Ossifikation wird durch spezialisierte Fibroblasten aus ungeordneten Kollagenfibrillen und Zwischensubstanz Osteoid gebildet, das nach Einlagerung von Kalksalzen den Faser- oder Geflechtknochen darstellt. Dieser wird ebenfalls sekundär zu reifem, lamellären Knochen umgebaut. Die desmale Knochenbildung findet sich vor allem im Bereich der Schädelkalotte und des Periosts, aber auch bei allen sekundären Knochenumbauvorgängen [45].

Histologisch-morphologisch wird die Frakturheilung in 4 Stadien unterteilt:

1. Entzündung

Dieses Stadium beginnt sofort nach einer Krafteinwirkung auf den Knochen mit dem Auftreten erster Entzündungszellen. Es endet mit der ersten Bildung von Knorpel oder Knochen. Nach Ausbildung des Frakturhämatoms und Unterbrechung der Blutversorgung kommt es an den Frakturrenden zur Knochennekrose und zur Schädigung der Knochengrundsubstanz. Aus den geschädigten Zellen werden

verschiedene Stoffe (Enzyme, Zytokine etc.) freigesetzt, die an der Induktion der Frakturheilung beteiligt sind [10, 15]. Rund um die Frakturstelle wird eine stark erhöhte Zellproliferationsrate des mesenchymalen Bindegewebes beobachtet [7, 10, 27]. Zusätzlich wandern Entzündungszellen (neutrophile Granulozyten, Makrophagen, Mastzellen) in den Frakturbereich, welche für das Debridement verantwortlich sind. Daneben finden sich an den Knochenenden Osteoklasten, die mit der Resorption des nekrotischen Knochens beginnen [15, 27]. Einsprossende Kapillaren, einwandernde Fibroblasten und einsetzende Kollagenbildung wandeln das Frakturhämatom in Granulationsgewebe um. Erste Mineralablagerungen entlang der Kollagenfibrillen können beobachtet werden [5].

Klinisch entspricht dieses Stadium der Phase von Schmerz und Schwellung im Frakturbereich.

2. Weicher Kallus

Dieses Stadium reicht bis zur bindegewebigen oder knorpeligen Überbrückung und damit zur ersten mechanischen Stabilisierung der Fraktur [10, 15]. Die Frakturrenden sind nun nicht mehr beweglich. Kapillaren wachsen reichlich ein, einhergehend mit einer erhöhten Proliferation von mesenchymalen Bindegewebs- und Osteoblasten-Vorläuferzellen. Die Osteoklastenaktivität an den Frakturrenden steigert sich und erstmals erscheinen Chondroblasten [10] und Osteoblasten [27] im Granulationsgewebe. Subperiostal beginnt die Knochenneubildung. Fibrovaskuläres Stroma wird durch von den Chondroblasten gebildetes Chondroid ersetzt [15].

Klinisch zeichnet sich diese Phase durch das Verschwinden von Schwellung und Schmerz aus.

3. Harter Kallus

In dieser Phase der Frakturheilung wird der knorpelige Kallus durch enchondrale Ossifikation in primäre Spongiosa und Geflechtknochen umgewandelt, welcher die Fraktur stabil überbrückt [7, 9, 15]. Die extrazelluläre Knorpelmatrix wird kalzifiziert. Entlang der einwachsenden Kapillaren folgen Osteoblasten, welche Osteoid synthetisieren und die sogenannte primäre Spongiosa bilden. Dieser Vorgang läuft solange bis der gesamte Knorpel durch neu gebildeten Knochen ersetzt ist [7]. Der

daraus entstandene Geflechtknochen hat keine geordnete Ausrichtung sondern strukturiert sich anhand der eingesprosssten Kapillaren. Am Ende dieser Phase ist die mechanische Stabilität wieder gewährleistet [7] und die Fraktur gilt klinisch und radiologisch als geheilt [10, 15].

4. Remodeling

Der Geflechtknochen wird in dieser abschliessenden Phase der Frakturheilung durch Lamellenknochen ersetzt. Der Markkanal langer Röhrenknochen wird wieder hergestellt und der Knochen erreicht durch diese Umbauvorgänge wieder seine normale Form. Dieser Prozess kann Monate bis Jahre in Anspruch nehmen [10, 15, 27, 42] und wird durch das Wolff'sche Gesetz, beziehungsweise die mechanische Belastung gesteuert [58]. Am Ende der Umbauvorgänge weist der Knochen wieder seine ursprüngliche biomechanische Stabilität auf [27].

Wird eine Fraktur chirurgisch behandelt, werden die Abläufe der natürlichen Frakturheilung unterbrochen oder durch andere Mechanismen weitergeführt [15, 36]. Dabei spielt vor allem die Stabilität der Frakturfixation eine entscheidende Rolle [15, 36, 43]. Frakturen, die durch rigide Implantate (z.B. Dynamische Kompressionsplatten) unter Kompression stabilisiert werden, zeigen eine Heilung ohne radiologisch erkennbaren Kallus, d.h. eine *direkte oder primäre Frakturheilung* [43, 46, 48, 49]. Frakturen, die mit nicht-rigiden Implantaten (z.B. intramedulläre Nägel, spezielle Plattensysteme mit Fixateur-Interner Funktion) stabilisiert werden, durchlaufen den sequentiellen Ablauf der Frakturheilung (Gewebsdifferenzierung, Oberflächenresorption, Kallusbildung, Remodeling). Dies wird als *indirekte oder sekundäre Frakturheilung* bezeichnet und führt zu einer sehr guten knöchernen Regeneration mit normaler Stabilität [15, 43].

In Abhängigkeit von der Art der Stabilisation, der Breite des Frakturspaltes, der Geschwindigkeit der Frakturheilung und der Qualität der umgebenden Weichgewebe werden 4 Typen der Frakturheilung unterschieden [36]:

1. Primäre Kallusantwort

Dieser Heilungstyp tritt bei allen Frakturen unabhängig von der Art der Fixation auf. Die Kallusbildung erfolgt subperiostal und geht von den Zellen des intakten Periostes aus. Der entstandene Kallus entsteht innerhalb von zwei Wochen unabhängig von äusseren oder hormonellen Einflüssen und ist nicht in der Lage, den Frakturspalt zu überbrücken.

2. Externe Kallusbildung

Bei Frakturen mit fehlendem Knochenkontakt setzt diese relativ schnelle Form der knöchernen Heilung ein. Diese ist jedoch nur möglich bei intakten, vitalen Weichteilen, da sie von den Zellen des umgebenden Gewebes ausgeht. Knochendefekte können überbrückt werden und Bewegungen im Frakturspalt werden toleriert. Der externe Kallus entsteht bei der Frakturbehandlung mit Fixationsverbänden oder nicht-rigiden Osteosyntheseverfahren. Wird trotz rigider Fixation externer Kallus gebildet, so ist dies ein Zeichen für die Instabilität der Osteosynthese.

3. Späte medulläre Kallusbildung

Diese Form des Kallus entsteht häufig gleichzeitig mit externem Kallus. Der Kallus zeigt eine geringe Knorpelbildung, wird relativ langsam gebildet, toleriert Mikrobewegungen und kann Defekte überbrücken, solange die Stabilität im Frakturspalt gewährleistet ist. Die Ernährung des medullären Kallus ist unabhängig von den umgebenden Weichteilen, da seine Ernährung und Ausbildung allein von der Markdurchblutung ausgeht. Medulläre Kallusbildung findet sich hauptsächlich bei stabil fixierten Frakturen, bei denen keine exakte, spaltfreie Reposition der Frakturende erreicht wurde.

4. Primäre oder direkte kortikale Heilung

Eine primäre oder direkte Frakturheilung ist bei absolut stabiler Frakturfixation, spaltfreier Reposition (Spaltbreite <1mm [15]) und Kompression der Frakturende möglich. Der Knochen heilt ohne sichtbare Kallusbildung [16, 43, 48]. Die Gewebedifferenzierung und die Resorption der Knochenoberfläche werden übersprungen und die Frakturheilung geht direkt ins Remodeling des Haver'schen

Systems über. Histologisch ist diese Form der Frakturheilung gekennzeichnet durch Cutting Cones [48], welche die Fraktur überbrücken und zu einer direkten knöchernen Vereinigung der Fraktarenden führen. Osteone bestehen aus einem zentralen ernährenden Gefäss. An der Spitze liegende Osteoklasten resorbieren den nekrotischen Knochen während perivaskulär liegende Osteoblasten simultan neuen Knochen bilden. Die primäre Frakturheilung verläuft sehr langsam. Zuletzt entsteht ein knöchernes Regenerat, welches im Vergleich zur natürlichen Knochenbruchheilung eine geringere mechanische Stabilität aufweist [15].

Unklar ist, was den Vorgang des Remodeling bei stabil fixierten Frakturen oder Osteotomien auslöst. Die lokale Nekrose ist einer der Faktoren, die als Stimulus für diese Endphase der knöchernen Heilung diskutiert werden [43].

Die Regeneration einer Osteotomie ist von folgenden Punkten abhängig [24]:

- vom Patienten (Alter, Kondition)
- vom Ort der Osteotomie (die Metaphyse heilt schneller als die Diaphyse)
- vom Zugang (wenig Weichteile zerstören, Periost intakt lassen)
- vom Osteotomietyp und der jeweiligen Belastung der Schnittoberfläche
- von der Knochentemperatur an der Schnittfläche und der Dauer der Wärmeeinwirkung
- von der Schnittoberfläche, je feiner desto grösser ist die Berührungsfläche; je rauer, desto grösser ist die Stabilität
- von der Ablagerung von Debris, Schmutz und anderen Produkten an der Schnittoberfläche. Je mehr, desto länger brauchen die Makrophagen um aufzuräumen und desto langsamer verläuft die Regeneration.
- von der Art der Osteotomiefixation.

Während spontane Frakturen oft eine unregelmässige und durch Zacken sich gut verzahnende Frakturoberfläche zeigen, entsteht durch eine Osteotomie eine glatte Oberfläche. Diese würde an und für sich eine primäre Frakturheilung begünstigen, doch andere Faktoren, wie thermische Schädigungen und Mikrofrakturen durch den Sägevorgang lassen eine von der Spontanfraktur unterschiedliche Situation entstehen.

2.2 Methoden und Techniken der Osteotomie

Für die operative Knochendurchtrennung stehen verschiedene Werkzeuge und Techniken zur Verfügung. Welche Methode vorteilhaft ist, hängt wesentlich vom übergeordneten chirurgisch-orthopädischen Behandlungskonzept, der Lokalisation und der nachfolgenden Implantatwahl ab. Je höher die biologischen Anforderungen an die Schnittflächen sind, desto entscheidender ist ein gewebeschonendes Vorgehen unter Beachtung der Vaskularität und Vermeidung von Wärmeentwicklungen während der Knochendurchtrennung. Die Implantate geben den Zugangsweg vor, dieser sollte auch für die Knochendurchtrennung genutzt werden [4].

Meissel

Die Knochendurchtrennung mit dem Meissel ist frei von Wärmeentwicklung und über kleine, weichgewebeschonende Stichinzisionen möglich. Da zumindest bei der Corticotomie nicht der gesamte Querschnitt über einen Zugang erreichbar ist, empfiehlt sich im Diaphysenbereich eine Kombination mit zusätzlichen Massnahmen. Die Schnittflächen werden nicht fein, es entstehen häufig Knochensplitter und eine exakte Führung ist nicht möglich [4]. Bei brüchigem Knochen besteht die Gefahr von Fissuren.

Oszillierende Säge

Die oszillierende Säge wird empfohlen, wenn die Region zur Stabilisierung ohnehin eröffnet werden muss, wie es z.B. zur Plattenosteosynthese der Fall ist, oder wenn der Anspruch an die Schnittflächen, wie bei Endoprothesen, überwiegend exakter mechanischer und weniger biologischer Natur ist [4].

Markraumsäge

Indikationen für die Markraumsäge liegen immer dann vor, wenn als anschliessendes Stabilisierungsverfahren ein Marknagel gewählt wird. Da der Markraum ohnehin eröffnet, und das endostale Gefässsystem zerstört oder zumindest kompromittiert ist, sollte das Periost unberührt bleiben. Mit der Markraumsäge lässt sich im Diaphysenbereich eine vollständige Osteotomie erzielen, oft ist auch am Übergang zur

Methaphyse zumindest eine zirkuläre Schwächung möglich, so dass die restliche Knochenbrücke durch Osteoklasie oder durch eine kleine Inzision von aussen, z.B. mit einem Meissel, durchtrennt werden kann [4].

Gigli-Säge

Mit der Gigli-Säge können Osteotomien gewebeschonend und mit geringer Wärmeentwicklung durchgeführt werden. Die Schnittflächen werden nicht sehr fein [4].

Laser

Mit CO₂ Lasern können Osteotomien ohne schädigende Wärmeentwicklung vorgenommen werden. Dadurch, dass der Laser nicht wie alle anderen Methoden von Hand geführt, sondern computergesteuert betrieben wird, können sehr präzise Schnittmuster erzielt werden. Bei platten Knochen ist der Materialverlust klein, was jedoch bei Röhrenknochen durch die Art des Schnittes nicht gewährleistet ist. Um bis zum Gegencortex zu gelangen, muss der Laser im nahen Cortex kreisende Bewegungen ausführen. Daraus resultiert ein V-förmiger Osteotomiespalt [26].

Ultraschall-Säge

Vorteilhaft ist der hämostatische Effekt auf Höhe der Schnittoberfläche und die gute Manövrierbarkeit welche das Risiko limitiert, umgebendes Gewebe zu beschädigen. Die Schnittoberfläche wird zwar feiner, die Schneidezeit jedoch länger und die Wärmeentwicklung grösser als mit einer konventionellen Säge [24].

Abrasiver Wasserjet

Durch Osteotomie mit hohem Wasserdruck wird keine Wärme produziert. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, den Wasserdruck in einen Roboter einzubauen, was mit einer oszillierenden Säge der Vibration wegen unmöglich ist. Die Schnittoberflächen werden rauer als mit der oszillierenden Säge [50]. Von Hand geführt läuft man die Gefahr, dass man wenn der Cortex durchschnitten ist und man ins Mark gelangt, die Kontrolle verliert und erheblicher Schaden im Knochenmark angerichtet werden kann [24].

Für ein ideales Osteotom sind folgende Punkte bedeutend [24]:

Es soll:

- schnell schneiden, um eine kurze Operationsdauer zu gewährleisten
- relativ mühelos schneiden, damit der Chirurg Kontrolle über das Gerät behält
- kein Knochengewebe verloren gehen und es gilt zu vermeiden, dass dieses ins Operationsgebiet gelangt
- kein Knochengewebe durch Wärmeeinwirkung oder andere schädliche Prozesse zerstören
- Knochenregeneration weder verhindern noch verlangsamen
- umgebendes Gewebe nicht beschädigen
- keine unerwünschten biologischen Effekte haben
- leicht, einfach zu handhaben und sterilisierbar sein
- eine Osteotomie in verschiedenen Ebenen erlauben

2.3 Oszillierende Säge

Da in diesem Versuch eine oszillierende Säge benutzt wurde, wird im Folgenden diese Technik näher beschrieben und die weiteren Ausführungen auf diese Art der Osteotomie beschränkt.

2.3.1 Technik und Geometrie

Aus anwendungsspezifischen Gesichtspunkten gibt es verschiedene oszillierende Sägetypen. Diese beruhen alle auf dem Prinzip, dass der Knochen durch eine sehr schnelle oszillierende Bewegung durchtrennt wird. Die Zahnform ist üblicherweise symmetrisch ausgebildet. Die mechanische Schädigung des Knochens entsteht durch das Eingreifen der Werkzeugschneiden in den Knochen. Bei dieser Osteotomie wird Knochenmaterial von der Schnittfläche abgetragen. Bei einem unsachgemässen Einsatz des Werkzeuges kann es zum Herausbrechen von Knochenstücken oder zur Bildung von Rissen und Mikrofrakturen kommen.

Damit sich die Sägewerkzeuge beim Schneiden nicht im Schneidespalt festsetzen, werden die Zähne entweder breiter als der Rücken des Sägeblattes ausgeführt oder

sie erhalten eine Schränkung. Dadurch wird der Schneidespalt breiter als das Sägewerkzeug, die Zähne schneiden sich frei und die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück wird vermindert. Ein ungeschränktes Sägewerkzeug besitzt den Vorteil, dass sich glatte Oberflächen ergeben, die eine exakte Reposition nach der Osteotomie gewährleisten. Auch sind diese Oberflächen weitgehend spanfrei, so dass kein avitales Gewebe auf der Schnittfläche zurückbleibt. Dabei muss aber die Verbreiterung der Sägezähne auf einen eng begrenzten Raum der Sägezahnspitzen beschränkt werden, um die Reibung möglichst niedrig zu halten. Zur Verbesserung der Spanabnahme können die Zähne wechselweise seitlich abgeschrägt werden. Damit wird die Verformungsarbeit bei der Zerspanung herabgesetzt und damit auch eine Teilmenge der dabei entstehenden Wärme [37].

Der Körper des Sägeblattes ist charakterisiert durch die Länge, Breite, Dicke und den Schwingradius. Der Spanwinkel ist für symmetrische Zähne immer negativ [2].

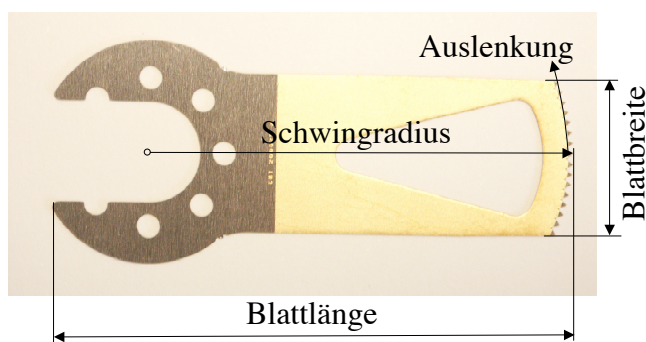


Abbildung 1: Masse eines Sägeblattes

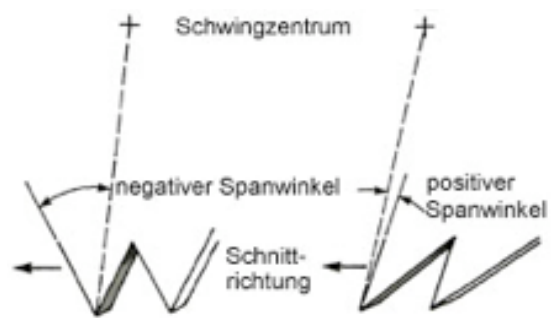


Abbildung 2: positiver und negativer Spanwinkel aus [2]

Ein positiver Spanwinkel von 3° erzielt niedrigere Temperaturen als ein negativer Spanwinkel von 30° und die Knochenentfernungsrate ist beim positiven Spanwinkel kleiner [1]. Auch bei einem negativen Spanwinkel von 10° entstehen tiefere Temperaturen als bei einem negativen Winkel von 30° [29]. Durch einen grösseren Schwingradius wird die Knochenentfernungsrate erhöht [1].

Um die Kräfte und den Energieaufwand des Schneidens zu senken, sind ein kleiner negativer Spanwinkel und eine hohe Vorschubgeschwindigkeit für nicht vibrierendes Schneiden optimal. Für vibrierendes Schneiden wären ein kleiner negativer Spanwinkel, eine niedrige Frequenz und eine hohe Amplitude wünschenswert. Diese

Energie- und Schneidekraftreduktion bedeutet, dass weniger Wärme entwickelt wird und folglich die Knochentemperatur und die Möglichkeit der Hitzenekrose reduziert werden. Der Arbeitsaufwand des Chirurgen und des Instrumentes ist herabgesetzt, was die Nutzungszeit des Instrumentes verlängert, den Vorgang für den Chirurgen vereinfacht und die Operationsdauer verkürzt [31].

Nach mehrmaligem Gebrauch eines Sägeblattes entstehen Schäden an den Zähnen, vor allem wenn das Sägeblatt auf Metall trifft. Dann sollte umgehend ein neues verwendet werden [57].

Zusammenfassend lässt sich folgende optimierte Werkzeuggeometrie angeben [37]:

Optimierte Werkzeuggeometrie	
Sägeblattdicke	0.3 - 0.6 mm
Spanwinkel	-15° bis -25°
Spanraum	gross
Teilung	gross
Schränkungsweite / Sägeblattdicke	> 1.7
Schränkung	ungeschränkt, Zahnspitzen verbreitert
Zahnform	symmetrisch, wechselweise seitlich abgeschrägt

Das wichtigste Kriterium beim Sägen ist die Vermeidung der thermischen Schädigung. Dies kann durch niedrige Temperaturen und kurze Schnittzeiten erreicht werden, bei denen der Wärmeübergang in den Knochen geringer, die Einwirkzeit und auch die Operationszeit kürzer ist. Dies stellt sich zum einen bei einer Sägeblattdicke von 0.3 - 0.6 mm ein. Diese dünnen Sägewerkzeuge sind vom Operateur leicht zu handhaben. Mit ihnen kann mit niedrigem Kraftaufwand gearbeitet und der Knochen schnell durchtrennt werden. Durch die schlechte Wärmeleitung des Knochens und dem geringeren Zerspanvolumen treten auch niedrigere Temperaturen auf. Ein weiterer Vorteil ist der geringere Materialverlust. Der Nachteil dieser dünnen Werkzeuge liegt in der geringen Biegesteifigkeit und höheren Nachgiebigkeit. Sie können aus ihrer Vorschubrichtung ausweichen und sich im Sägespalt verwinden.

Zum anderen kann über die Geometrie der Sägezähne folgendes gesagt werden: Ein kleiner negativer Spanwinkel ist günstig für die spanende Bearbeitung bei diesen

hohen Schnittgeschwindigkeiten. Eine Veränderung des Spanwinkels in positiver Richtung bringt hinsichtlich der Temperaturerniedrigung weitere Verbesserungen. Dadurch erhält die Säge aber ein aggressiveres Schneideverhalten. Das Werkzeug hakt wesentlich leichter in den Knochen ein und die Handhabung verschlechtert sich. Die derzeitigen Sägewerkzeuge mit negativen Spanwinkeln durchtrennen das umliegende Gewebe des Knochens nicht, denn diese Sägezähne verdrängen das Gewebe um den Betrag des Sägehubes. Ein Sägezahn mit positivem Spanwinkel würde im Weichteilgewebe einhaken und es durchschneiden.

Der Spanraum der Säge und die Teilung sollten möglichst gross gewählt werden, damit die anfallende Spanmenge gut aufgenommen und abgeführt werden kann. Zugesetzte Spanräume können keine weiteren Späne abscheren, sie reiben nur auf dem Knochen mit zusätzlicher Temperaturerhöhung. Eine gute Spanabfuhr muss auch gewährleistet sein, damit nicht die zwischen Knochen und Sägeblatt eingeklemmten Späne zu einer zusätzlichen Aufheizung des Knochens führen.

Auch das Verhältnis zwischen Schränkungsweite und Sägeblattdicke muss gross gewählt werden, damit sich das Werkzeug gut freischneiden kann und eine optimale Spanabfuhr gewährleistet ist [37].

2.3.2 Wärmeentwicklung

Beim Einsatz oszillierender Sägewerkzeuge in der Chirurgie treten hohe Temperaturen auf, die die Gefahr einer thermischen Schädigung des Gewebes in sich bergen. Das Ausmass einer Schädigung hängt von der Temperaturhöhe und deren Einwirkzeit ab, welche im wesentlichen von der Werkzeuggeometrie, der Beschaffenheit des Knochens, den Schnittbedingungen, dem Einsatz einer Kühlung und dem Verschleisszustand des Sägewerkzeugs beeinflusst werden. Durch die Erhöhung der Drehzahl und der Vorschubkraft können die Schnittzeit minimiert und die Temperatur im Knochen verringert werden. Durch den Einsatz eines Kühlmittels kann die Temperatur, bei gleichzeitiger Verschlechterung der Schnittzeit, erheblich gesenkt werden. Der Verschleisszustand des Sägewerkzeuges ist bestimmend für das Vermeiden einer thermischen Schädigung. Bei Metallberührung während des Sägevorganges sollte dieses Sägewerkzeug nicht mehr weiter verwendet werden. [22]

Frühere Untersuchungen zeigten, dass durch die maschinelle Bearbeitung von Knochen signifikante Temperaturerhöhungen resultieren, welche Knochennekrosen verursachen [18, 29, 34, 35, 54, 55].

Beim Entstehen einer Nekrose tritt als Folge eine Resorption an den Fraktarenden auf. So spielt sich bei der Heilung von Osteotomien und Frakturen ein Wettlauf zwischen zwei gegensätzlichen Vorgängen ab, nämlich der Resorption von nekrotischem Gewebe und der Substitution desselben durch neu gebildeten Knochen [23]. Wärmeeinwirkungen beeinflussen diesen Wettlauf zugunsten der Resorption [25].

Die thermische Schädigung des Knochens ist beschrieben als irreversible Zerstörung der organischen Matrix durch eine Exposition erhöhter Temperaturen [21]. Frühere Studien beschrieben die Zerstörung bezüglich Temperaturen, bei denen Schlüsselproteine denaturiert werden. Die Alkalische Phosphatase wurde in vitro bei 56°C inaktiviert [35]. Bei einer Temperatur von 50°C entstanden mechanische Veränderungen im Knochen durch eine Neuorientierung der Kollagenmoleküle [8].

Es gibt Modelle von intern gekühlten Sägeblättern. Diese bestehen aus zwei Sägeblättern, dazwischen wird mit Kochsalzlösung gekühlt. Die Wärmeentwicklung im Knochen konnte erheblich reduziert werden, das doppelte Sägeblatt ist jedoch viel dicker [56]. Externe Kühlung hat die Temperatur nicht gesenkt [56]. Andere Autoren berichten, dass die externe Kühlung genauso gut ist, wie die teurere interne [6].

Je dicker das Sägeblatt, desto stärker die Wärmeentwicklung. Je schneller der Schnitt, desto tiefer die Temperatur [21]. Mit einem dickeren Sägeblatt wird mehr Vorschubkraft benötigt. Dies resultiert in einer niedrigeren Vorschubgeschwindigkeit, was wiederum zu einer längeren Kontaktzeit zwischen Werkzeug und Werkstück führt und somit zu einer höheren Temperatur im Knochen [37].

Über die Temperaturwerte gibt es verschiedene Angaben:

Im Jahre 1977 wurden beim Sägen ohne Kühlung Temperaturen bis 150°C im Sägeblatt erreicht. (In Abhängigkeit von Rotationsgeschwindigkeit, Penetrationsgeschwindigkeit, Schnitttiefe und Angriffswinkel) [28, 30].

1989 wurden mit einer konventionellen Säge ohne Kühlung Temperaturen von durchschnittlich 68°C (44-100°C) im Sägeblatt erreicht [55].

Bezüglich der Schädigung des Knochens gibt es verschiedene Angaben:

Eine Temperatur von 47°C für eine Minute vermindert die Knochenregeneration, während 44°C für mehr als eine Minute mit der Knochenheilung interferiert [17]. Temperaturen von mehr als 55°C für wenige Sekunden resultieren in Koagulation und Nekrose der Zellstrukturen [24] und Hitzeschock für 10 min bei 48°C verursacht Nekrose, aber keine Apoptose [51].

3 Material und Methoden

3.1 Aufbau der Studie

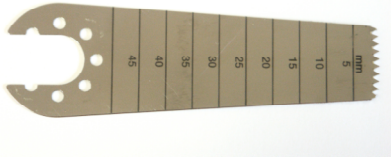
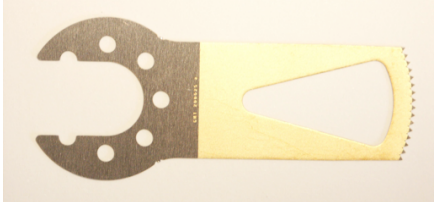

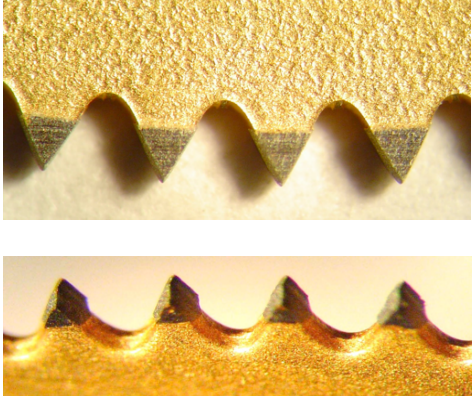
Für die experimentelle Studie wurden insgesamt 24 Schweizer Alpenschafe verwendet. Diese wurden in 4 Gruppen zu je 6 Tieren eingeteilt. Bei 12 Tieren wurde das herkömmliche Sägeblatt zur Osteotomie verwendet, bei 12 Tieren ein neues Spezialsägeblatt. Je 6 Tiere der verschiedenen Osteotomievarianten wurden nach 4 beziehungsweise 12 Wochen postoperationem geschlachtet (siehe Tabelle 1). Die Hälfte der Tiere wurde an der linken Tibia, die andere Hälfte an der rechten Tibia operiert.

Tabelle 1: Übersicht über Schafe, Sägeblatt und Zeitplan

Schafnummer	verwendetes Sägeblatt	Beobachtungszeitraum
1907	normal	4 Wochen
1908	normal	4 Wochen
1909	normal	4 Wochen
1910	normal	4 Wochen
1911	normal	4 Wochen
1912	normal	4 Wochen
1913	spezial	4 Wochen
1914	spezial	4 Wochen
1915	spezial	4 Wochen
1917	spezial	4 Wochen
1918	spezial	4 Wochen
1931	spezial	4 Wochen
1919	normal	12 Wochen
1920	normal	12 Wochen
1921	normal	12 Wochen
1922	normal	12 Wochen
1923	normal	12 Wochen
1924	normal	12 Wochen
1916	spezial	12 Wochen
1932	spezial	12 Wochen
1933	spezial	12 Wochen
1934	spezial	12 Wochen
1935	spezial	12 Wochen
1936	spezial	12 Wochen

3.2 Daten der beiden Sägeblätter

Tabelle 2: Daten der beiden Sägeblätter

Name	Kontrollsägeblatt	Spezialsägeblatt
Firma	Synthes	CMT Rickenbach
Bezeichnung	519.150	200025 b
Länge	69.6 mm	49 mm
Breite	14 mm	15 mm
Dicke Schaft	0.4 mm	0.28 mm
Dicke Schnittspitze	0.6 mm	0.35 mm
Anzahl Zähne	10	16
Schränkung, Verbreiterung	geschränkt, Zahnspitzen nicht verbreitert	ungeschränkt, Zahnspitzen um 0.07 mm verbreitert
Schwingradius	61 mm	40.5 mm
Auslenkung	4.8 mm	3.1 mm
Übersicht		
Zähne		

3.3 Versuchstiere

Die 24 für das Experiment verwendeten Schafe waren alle adult, weiblich oder männlich kastriert und gehörten der Rasse Weisses Alpenschaf an. Das Alter der Schafe wurde anhand der Zähne beurteilt und reichte von 2 bis 4 Jahren, im Durchschnitt 3 Jahre. Das Körpergewicht betrug 54 bis 95 kg, im Durchschnitt 70.3 kg. Die Tierversuche wurden nach den gesetzlichen Bestimmungen des schweizerischen Tierschutzgesetzes durchgeführt und von der kantonalen Veterinärbehörde bewilligt (Bewilligungsnummer 61/2004).

3.4 Vorbereitung der Versuchstiere

Die Tiere wurden beim Ankauf untersucht. Mittels eines Vacutainer Systems (Belliver Industrial Estate, Plymouth, Grossbritannien) wurde den Schafen Blut entnommen und am Virologischen Institut der Vetsuisse Fakultät Bern serologisch auf Maedi/Visna Antikörper untersucht. Die Tiere wurden solange separat gehalten, bis das Resultat bekannt war und positive Tiere wurden vom Betrieb entfernt. Die Schafe wurden mit Ivermectin s.c. (Ivomec®; 0.5ml/25kg; Biokema, Crissier-Lausanne, Schweiz) und Triclabendazol+Levamisol p.o. (Endex® 19.5%; 1ml/5kg; Novartis AG, Basel, Schweiz) antiparasitär behandelt und mit Pulpyvax®-T s.c. (Essex Tierarznei, Vertrieb Veterinaria AG, Bern, Schweiz) gegen Tetanus und Breinierenkrankheit geimpft. Die Impfung wurde zur Grundimmunisierung nach 6-8 Wochen wiederholt. Zudem wurden sie mittels Ultraschall auf Trächtigkeit untersucht. Bei negativem Ultraschallbefund wurde den Tieren zweimalig im Abstand von 10 Tagen s.c Prostaglandin F2alpha; Dinoprost (Dinolytic®; 10mg/Tier, Pfizer AG, Zürich, Schweiz) injiziert, um Trächtigkeiten der Tiere während der Studie sicher auszuschliessen. Desweiteren wurden die Schafe zweimal jährlich geschoren, jährlich mit Pulpyvax®-T geimpft, viermal jährlich entwurmt, alternierend mit Netobimin p.o. (Hapadex® 5%; 4ml/10kg; Berna Veterinärprodukte AG, Bern, Schweiz), Praziquantel p.o. (Cestocur®; 3.75mg/kg; Bayer AG, Leverkusen, Deutschland), Triclabendazol+Levamisol p.o. (Endex® 19.5%; 1ml/5kg; Novartis AG, Basel, Schweiz) und Ivermectin s.c. (Ivomec®;

0.5ml/25kg; Biokema, Crissier-Lausanne, Schweiz). In regelmässigen Abständen von 6 bis 8 Wochen wurden die Schafe einer Klauenpflege unterzogen. Die Schafe lebten in der Herde in einem grossen Stall mit Weideauslauf. Eine Woche vor der Operation wurden die Tiere in einen nähergelegenen Stall transportiert, wo sie in kleineren Gruppen in Boxen gehalten wurden. Mittels eines Vacutainer Systems wurde ihnen Blut entnommen, welches hämatologisch und chemisch im Labor der Vetsuisse Fakultät Zürich untersucht wurde um eventuelle Narkoserisiken auszuschliessen.

24 Stunden vor der Operation wurden die Tiere in eine Boxe mit Hobelspänen gebracht, wo sie freien Zugang zu Wasser hatten, aber kein Futter bekamen. Sie wurden gewogen und von oberhalb der Klaue bis zum Bereich der Hüfte und im Halsbereich geschoren. Den Schafen wurde Herz und Lunge auskultiert und die rektale Temperatur gemessen.

3.5 Operation

Die Schafe wurden mit Medetomidin i.m. (Domitor®; 0.005mg/kg; Dr. E. Gräub AG, Bern, Schweiz) und Buprenorphin i.m. (Temgesic®; 0.01mg/kg; Essex Chemie AG, Luzern, Schweiz) prämediziert.

Zwanzig Minuten später wurden die Tiere in den Operationsraum geführt. Die geschorene Stelle am Hals wurde mit Hibiscrub®-Seife gewaschen, mit Alkohol (70%) entfettet und mit Hibitane®-Tinktur (Zeneca AG, Luzern, Schweiz) desinfiziert. Zur Lokalanästhesie wurde 1ml Lidocain-Hyaluronidase 2% (G.Streuli&Co AG, Uznach, Schweiz) subkutan an der Kathetereinstichstelle injiziert. Dann wurde ein Venenverweilkatheter (Vygonüle S® G14; Vygon GmbH; Aachen; Deutschland) in die Vena jugularis gelegt und ein IN-Stopper (Braun Melsungen AG; Melsungen, Deutschland) als Verschluss aufgesetzt. Der Katheter wurde mit einem nicht resorbierbaren Nahtmaterial (Supramid® 2/0; Aesculap AG & Co, Tuttlingen, Deutschland) angenäht.

Präoperativ bekamen die Schafe zur Antibiose Benzylpenicillin i.v. (30'000 I.U./kg; Penicillin Natrium, G.Streuli&Co AG, Uznach, Schweiz) und Gentamycin i.v. (6mg/kg; G.Streuli&Co AG, Uznach, Schweiz), als nicht steroidales Antiphlogistikum Carprofen

i.v. (4mg/kg; Rimadyl®; Pfizer, Vertrieb Dr. Gräub AG, Bern, Schweiz). Zusätzlich wurde 3000 I.E. equines Tetanusantitoxin s.c. (Tetanus-Serum Intervet; Vertrieb Veterinaria AG, Zürich, Schweiz) verabreicht.

Danach wurde die Anästhesie mit Ketamin i.v. (Narketan10®; 2mg/kg; Vetoquinol AG, Belp-Bern, Schweiz) und Diazepam i.v. (Valium®; Roche Pharma AG, Rheinach, Schweiz) eingeleitet. Bei Bedarf wurde zusätzlich Propofol i.v. (2-4mg/kg; Fresenius Kabi AG, Stans, Schweiz) injiziert. Der Kehlkopf wurde mit einem Sprühstoss Lidocain (Xylocain®Spray; 10mg/Tier; Astra Pharmaceutica AG, Dietikon, Schweiz) lokal anästhesiert und dann wurde intubiert. Die Anästhesie wurde mit 1-1.5% Isofluran (Forene®; Abbott AG, Baar, Schweiz) und Sauerstoff aufrechterhalten. Es wurde ein arterieller Ohrkatheter zur Blutgasmessung gelegt und eine Infusion mit Ringerlaktat an den Venenkatheter angehängt. Die Cornea wurde mit einer Augensalbe (Vitamin A Dispersa®; Novartis AG, Basel, Schweiz) vor Austrocknung geschützt.

Die Operation folgte in Seitenlage. Das obere Hinterbein wurde nach craniodorsal ausgebunden. Das untere, zu operierende Bein lag auf der Unterlage plan auf. Das Operationsfeld wurde nachgeschoren, mit Hibiscrub®-Seife gewaschen, mit Alkohol (70%) entfettet, mit Hibitane®-Tinktur desinfiziert und mit sterilen Operationstüchern abgedeckt.

Der Zugang zur Tibia erfolgte von medial. Eine ca. 17cm lange Hautinzision wurde gesetzt. Dann wurden die Subcutis und die Faszie bis auf die Tibia mit dem Kauter freipräpariert und die Blutungen gestillt. Die 10-Loch 3.5 mm-DCP (Synthes, Oberdorf, Schweiz) wurde auf die freiliegende Tibia gelegt und mittels eines Plattenbiegers (Synthes, Oberdorf, Schweiz) angepasst. Die Platte wurde fixiert, das distalste Loch gebohrt, die Schraubenlänge gemessen, das Gewinde geschnitten und dann die Schraube eingedreht. Gleichermassen wurde die fünfte Schraube gesetzt. Für die zweite, dritte und vierte Schraube wurde das Loch gebohrt, die Schraubenlänge gemessen und das Gewinde geschnitten. Proximal der Platte wurde das Loch für den Plattenspanner in den medialen Cortex gebohrt und das Gewinde geschnitten. Mit dem Kauter wurde die Osteotomiestelle zwischen dem 5. und 6. Plattenloch an-gezeichnet. Dann wurden die zwei gesetzten Schrauben wieder entfernt und die Platte

beiseite gelegt. Das Periost an der Osteotomiestelle wurde mit einem Raspatorium entfernt. Zwei Hohmannhebel wurden von cranial und von caudal unter die Tibia gelegt. Mit der mit 1968g Gewicht versehenen oszillierenden Säge (Swiss 519.00 ARO, Synthes, Oberdorf, Schweiz) wurde unter Kühlung durch eine Kochsalzlösung die Tibia durchgesägt (siehe Abbildung 27 und Abbildung 28). Nach erfolgter Osteotomie wurde die Platte mit den vorbereiteten Schrauben am distalen Teil der Tibia wieder angeschraubt. Der Plattenspanner (321.12, Synthes, Oberdorf, Schweiz) wurde mit einer 10 mm langen Schraube fixiert und die Platte eingehängt. Die Osteotomie wurde reponiert und der Plattenspanner mittels eines Sechskant-Schlüssels bis zum grünen Bereich angezogen. Dies entspricht einer interfragmentären Kompression von 300N (AO-Manual). Das erste Loch proximal der Osteotomie wurde exzentrisch gebohrt, die Schraubenlänge gemessen, das Gewinde geschnitten und die Schraube eingedreht. Der Plattenspanner wurde entfernt und die weiteren Schrauben neutral gesetzt.

Nach Beendigung der Fixation wurden die Faszie und die Subcutis je mit einer fortlaufenden Naht geschlossen. Dazu wurde ein resorbierbares Nahtmaterial (Polyglactin; Vicryl® 2-0; Johnson&Johnson Intl., Brüssel, Belgien) verwendet. Die Haut wurde mit Klammern verschlossen (Davis+Geck Appose ULC®; Vertrieb B. Braun Aesculap AG, Tuttlingen, Deutschland).

Danach wurden eine mediolaterale und eine caudocraniale Röntgenaufnahme gemacht (siehe Abbildung 29). Zuletzt wurde ein Stützverband angebracht, der wie folgt aufgebaut war: Zur Wundabdeckung wurde ein Saugkompresse (Mesorb®; Mölnlycke Health Care AB, Göteborg, Sweden) benutzt. Es wurde mit Watte gepolstert, mit einer kohäsiven elastischen Fixierbinde (Elastomull®haft; BSN medical GmbH & Co., Hamburg, Deutschland) angezogen, dann mit Papierkreppbinden (Cello-Crêpe®; IVF Hartmann AG, Neuhausen, Schweiz) umwickelt und darüber drei Rollen Fixationsbandage (Scotchcast Plus® 7.6cm; Laboratoires 3M Santé, Cergy Pontoise Cedex, Frankreich) aufgebracht. Darüber wurde eine Pflasterbinde (Isoelast®; IVF Hartmann AG, Neuhausen, Schweiz) gewickelt und die Enden mit Tesaband (Tesa AG, Hamburg, Deutschland) festgeklebt.

Den Schafen wurde eine neue Ohrmarke mit projektbezogener Nummer und Farbe eingezogen.

Nach der Operation wurden die Schafe noch halb schlafend, zu zweit in eine frisch eingestreute Boxe gebracht, wo sie sofort Heu angeboten bekamen. Am Operationstag bekamen die Tiere zur Schmerzbekämpfung noch zweimal im Abstand von vier Stunden Buprenorphin i.m. (Temgesic®; 0.01mg/kg; Essex Chemie AG, Luzern, Schweiz). Am Tag der Operation und 3 Tage postoperativ wurde den Schafen zur Antibiose Benzylpenicillin i.v. (30'000 I.U./kg; Penicillin Natrium, G.Streuli&Co AG, Uznach, Schweiz) und Gentamycin i.v. (6mg/kg; G.Streuli&Co AG, Uznach, Schweiz) zweimal täglich, als nicht steroidales Antiphlogistikum Carprofen i.v. (4mg/kg; Rimadyl®; Pfizer, Vertrieb Dr. Gräub AG, Bern, Schweiz) einmal täglich injiziert. Dann wurde der Venenverweilkatheter entfernt.

3.6 Weiterer Verlauf

4 Wochen-Gruppe:

Den Schafen wurde alle 10 Tage der Cast gewechselt. Beim ersten Castwechsel wurden die Hautklammern entfernt. Drei Tage vor der Schlachtung wurde den Tieren zur Fluoreszenzmarkierung [44] des neu gebildeten Knochens und des Remodeling Calceingrün s.c. (1ml/kg; Fluka AG, Buchs, Schweiz) injiziert.

12 Wochen-Gruppe:

Den Tieren wurde alle 10 Tage der Cast gewechselt. Beim ersten Castwechsel wurden die Hautklammern entfernt. Nach 6 Wochen wurde der letzte Cast abgenommen und für 10 Tage ein modifizierter Robert Jones angelegt. 4 und 8 Wochen postoperationem wurden zur Kontrolle je eine mediolaterale und eine craniocaudale Röntgenaufnahme angefertigt (siehe Abbildung 30 und Abbildung 31). Zur Fluoreszenzmarkierung [44] des neu gebildeten Knochens und des Remodeling wurde den Schafen nach 4 Wochen Calceingrün s.c. (1ml/kg; Fluka AG, Buchs, Schweiz), nach 8 Wochen Xylenolorange s.c. (1ml/kg; Fluka AG, Buchs, Schweiz) und 3 Tage vor der Schlachtung Tetracyclin i.m. (Terramycin®/LA Long Acting, 1ml/8kg; Pfizer AG, Zürich, Schweiz) injiziert.

Die Tiere lebten von der vierten Woche postoperationem an zu sechst in einer grösseren Boxe. Die Klauen wurden regelmässig gepflegt.

3.7 Probenaufbereitung und –auswertung

3.7.1 Gewinnung und Aufbereitung der Proben

Die Schafe wurden nach 4, beziehungsweise 12 Wochen geschlachtet. Sie wurden mit einem Bolzenschuss betäubt, am gesunden Hinterbein aufgehängt und dann entblutet. Die operierte Tibia wurde herausgetrennt und freipräpariert. Die Schrauben wurden mittels eines 3.5 mm Schraubenziehers herausgedreht und die Platte mit einem Meissel entfernt. Die Tibia wurde sowohl mit, als auch ohne Platte von medial und cranial fotografiert (Minolta, Dimage 7). Danach wurde von mediolateral und von craniocaudal ein Röntgenbild angefertigt (50kV, 1s, 3mA; Faxitron X-Ray Systems; Hewlett Packard, Mc Minnville Division, Oregon, USA) (siehe Abbildung 32, Abbildung 34 und Abbildung 36).

Mit der Bandsäge (Kolbe Maschinentechnik GmbH, Elchingen, Deutschland) wurde proximal und distal dem ersten Schraubenloch der Osteotomiestelle die Tibia durchsägt. Dann wurde der Knochenblock mit einer Bandsäge (Exakt Apparatebau, Norderstedt, Deutschland) längs durch die Schraubenlöcher in zwei Hälften gespalten und ein Teil in 4%ige gepufferte Formalinlösung gegeben, worin die Probe ca. eine Woche bei Zimmertemperatur konserviert wurde. Der andere Teil wurde in eine Lösung mit 0.4% Fuchsin (Fluka AG, Buchs, Schweiz) in 50% Alkohol gegeben. Diese Probe wurde bei 4°C für ca. zwei Wochen konserviert. Die in Formalin gelagerten Proben wurden mit Wasser gewaschen, wobei das Wasser dreimal alle 20 min gewechselt wurde. Dann folgte eine aufsteigende Alkoholreihe zum Zwecke der Dehydratation. Die Proben wurden zuerst in 50% Alkohol gelegt, der dreimal im Abstand von 30 min gewechselt wurde. Daraufhin wurden sie zweimal 12 h in 70% Alkohol, zweimal 12 h in 80% Alkohol, einmal 12 h in 90% Alkohol, einmal 12 h in 96% Alkohol und viermal 12 h in 100% Alkohol entwässert, wobei bei den Proben in Fuchsinlösung jeweils 0.4% Fuchsin enthalten war. Es folgte eine vier Tage dauernde Entfettung unter Vakuum in Xylol bei Raumtemperatur. Das Xylol wurde nach dem

ersten Tag gewechselt. Dann wurden die Proben eine Woche lang unter Vakuum bei 4°C in Methylmetacrylat infiltriert. Zur Herstellung des Methylmetacrylats wurden Methacrylsäure-methylester (Fluka Chemie GmbH, Buchs, Schweiz), Dibutylphthalat (Merck-Schuchardt, Hohenbrunn, Deutschland) und Perkadox 16 (Dr.Grogg Chemie AG, Stetten, Schweiz) im Verhältnis 89.5 : 10 : 0.5 für 10 min in einem Magnetrührer gemischt. Dann wurden die Proben mit Methylmetacrylat in spezielle luftdichte Teflonformen eingebettet und mehrere Tage in einem ca. 32°C warmem Wasserbad zur Polymerisation aufbewahrt. Nach Aushärtung der Blöcke wurden sie mittels Historesinplastikkleber (Leica Instruments GmbH, Nussloch, Deutschland) und Schrauben aus der Form genommen. Das überflüssige ausgehärtete Methylmetacrylat wurde mit der Bandsäge (Kolbe Maschinentechnik GmbH, Elchingen, Deutschland) weggeschnitten und die Proben mit Historesinplastikkleber (Leica Instruments GmbH, Nussloch, Deutschland) auf Plastikaufsätze geklebt, die für die Fixierung in der Sägevorrichtung nötig waren.

Die in Formalin fixierten Proben wurden immer lichtgeschützt aufbewahrt, damit die Fluoreszenzfarbstoffe nicht ausbleichen konnten.

Mit einer Präzisionsinnenlochsäge (Leica® SP1600, Leica Instruments GmbH, Nussloch, Deutschland) wurden von den mit Formalin fixierten Blöcken 300µm starke Dickschnitte und 60µm starke Schnitte für die Fluoreszenz geschnitten. Aus den mit Fuchsin fixierten Blöcken wurden ebenfalls 60µm dicke Schnitte hergestellt. Die Schnitte wurden einen Tag mit Stahlplatten beschwert. Von den 300µm Schnitten wurde eine Mikroradiographie (27kV, 12s, 3mA; Faxitron X-Ray Systems; Hewlett Packard, Mc Minnville Division, Oregon, USA) angefertigt. Danach wurden die 300µm Schnitte mittels Schnellkleber (Cementit® CA 12, Merz+Benteli AG, Niederwangen, Schweiz) auf weisse Acropalträger, die beiden 60µm Schnitte auf Glasobjektträger geklebt. Die 300µm Schnitte wurden mit einer Schleif- und Poliermaschine (Planopol-V; Struers A/S, Rodovre, Dänemark) auf eine Dicke von ca. 40µm geschliffen und einer Oberflächenfärbung mit Toluidinblau unterzogen.

Danach wurde die Osteotomiestelle mit der Bandsäge (Kolbe Maschinentechnik GmbH, Elchingen, Deutschland) aus den Probenblöcken erneut ausgeschnitten, in kleinere Teflonformen eingebettet und im 32°C warmen Wasserbad polymerisiert.

Nach Aushärtung der Blöcke wurden sie wiederum mittels Historesinplastikkleber (Leica Instruments GmbH, Nussloch, Deutschland) und Plastikaufsätzen aus den Formen genommen. Mit der Präzisionsinnenlochsäge (Leica® SP1600, Leica Instruments GmbH, Nussloch, Deutschland) wurden die Blöcke zur Vorbereitung für die Dünnschnitte angesägt. Anschliessend wurden mit einem Mikrotom (Leica® RM 2155; Leica Instruments GmbH, Nussloch, Deutschland) 5µm dünne Schnitte angefertigt, welche dann mit Toluidinblau und der Von Kossa Färbung mit McNeal's Tetrachrom Gegenfärbung eingefärbt wurden.

3.7.2 Untersuchungsmethoden

3.7.2.1 Makroskopische Auswertung

Makroskopisch wurde an der ausgebeinten Tibia auf die Kallusmenge, die Sichtbarkeit des Osteotomiespalt, die Oberfläche des Periosts und die Blutungen im Periost unter der Platte geachtet. Die vier Parameter wurden nach einem Score- System bewertet (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Score- System Makroskopie

a) Kallusmenge			
0 keine	1 wenig	2 mässig	3 viel
b) Osteotomiespalt			
0 nicht sichtbar	1 kaum sichtbar	2 mässig sichtbar	3 gut sichtbar
c) Periost			
0 glänzend	1 teilweise aufgeraut	2 über dem ganzen Osteotomiespalt aufgeraut	
d) Blutungen			
0 keine	1 kaum	2 mässig	3 zahlreich

3.7.2.2 Auswertung der Röntgenbilder

Für die semiquantitative Bewertung der Röntgenbilder wurde ein Score- System entwickelt (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Score- System Radiologie

a) Reposition postoperativ			
0 nicht perfekt, deutliche Stufe	1 Verschiebung bis zu 1mm	2 perfekt/gut	
b) Absprengfrakturen/Fissuren			
0 ja	1 nein		
c) Osteotomiespalt			
0 gut sichtbar	1 halb sichtbar	2 nicht sichtbar	
d) Periostaler Kallus, Dicke des Kallus			
0 keiner	1 dünner als Cortex	2 gleich dick wie Cortex	3 dicker als Cortex
e) Füllung der Knochenmarkhöhle mit Kallusgewebe beim Osteotomiespalt			
0 keines	1 <50% gefüllt	2 >50% gefüllt	100% gefüllt
f) Restauration der Knochenmarkhöhle: ist das Kallusgewebe schon wieder im Abbau? Abheilung?			
0 nein	1 ja		
g) Implantatlage (Schrauben)			
0 gebrochen mit Dislokation der Frakturenden	1 Lockerungen mit Dislokation der Frakturenden	2 Lockerung/ Bruch ohne Dislokation der Frakturenden	3 alle fest

ad a), b): Die Reposition und das Vorhandensein von Absprengfrakturen wurde anhand der post operativen Röntgenbilder beurteilt.

ad c): Die postmortalen Röntgenbilder wurden mit einem Gerät mit besserer Auflösung aufgenommen (Faxitron X-Ray Systems; Hewlett Packard, Mc Minnville Division, Oregon, USA), was zur besseren Sichtbarkeit des Osteotomiespaltes führt.

ad d): Der plattennahe periostale Kallus wurde nur postmortal beurteilt, da bei den anderen Aufnahmen die Platte die Beurteilung verhinderte.

ad g): Die postmortalen Aufnahmen wurden nach Entfernung der Platte angefertigt, das heisst, es sind nur Schraubenbrüche, aber keine Schraubenlockerungen auf dem Röntgenbild sichtbar.

3.7.2.3 Histomorphometrie

Für die histomorphometrische Untersuchung wurden die Fuchsinsschnitte von einem Makroskop (Leica M 420®) aus bei 12.5 facher Vergrößerung über eine Kamera (Leica DC 200®) mithilfe entsprechender Software (Leica IM 1000®) in einen Computer eingelesen. Pro Schnitt wurden jeweils ein Bild vom plattennahen und ein Bild vom plattenfernen Cortex gemacht. Eine bildbearbeitende Software (Adobe Photoshop 7.0®) wurde benutzt, um das vitale, fuchsingefärbte Gewebe grün und das restliche Gewebe rot zu färben. Bei jedem Bild wurden die Bereiche linker Cortex, rechter Cortex und Gap ausgewählt. Anschliessend wurde mit einem speziellen Computerprogramm (MatLab 6.5, The Math Works, Inc., Natick, Massachusetts, USA) für jeden Bereich die grüne und die rote Fläche berechnet und die Verhältnisse grün / (grün + rot) gebildet. Die Flächen des linken und des rechten Cortex wurden addiert und das Verhältnis neu gebildet.

3.7.2.4 Semiquantitative Auswertung der Histologie

Für die semiquantitative Auswertung wurden die Fuchsin- und die Fluoreszenzschnitte verwendet. Sie wurden mit einem Mikroskop der Firma Leica® (Leica®MDL 505097) angeschaut. Für die Betrachtung der Fluoreszenzschnitte wurde die 5 fache, für die Fuchsinsschnitte je nach Kriterium die 1.25, 5, 10 oder 20 fache Vergrößerung gewählt.

Bei den Fuchsinschnitten wurde ein Score-System entwickelt (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Score- System Fuchsinschnitte

a) Apposition der Cortices			
0 nicht perfekt, deutliche Stufe		1 perfekt/gut	
b) Füllung der Knochenmarkhöhle mit Kallusgewebe beim Osteotomiespalt			
0 keines	1 <50% gefüllt	2 >50% gefüllt	100% gefüllt
c) Restauration der Knochenmarkhöhle: ist das Kallusgewebe schon wieder im Abbau? Abheilung?			
0 nein		1 ja	
d) periostaler Kallus, Dicke des Kallus			
0 keiner	1 dünner als Cortex	2 gleich dick wie Cortex	3 dicker als Cortex
e) Gap, ist Knochengewebe (Osteozyten) drin? Gap healing quer zum Cortex			
0 kein Gap healing	1 <50% Gap healing	1 >50% Gap healing	3 100% gap healing
f) Remodeling der Cortices, wie stark ist der Osteotomiespalt durchbaut? (längs dem Cortex)			
0 kein Remodeling	1 <50% Remodeling	2 >50% Remodeling	3 100% Remodeling

ad a): Für die Beurteilung der Apposition wurden zusätzlich die Mikroradiographien herangezogen.

ad d): Der periostale Kallus wurde sowohl plattennah als auch plattenfern beurteilt. Ein dicker Kallus ergab eine hohe Punktzahl, obwohl dieser nicht nur positiv, sondern auch als Folge einer leichten mechanischen Instabilität bewertet werden konnte.

ad e) & f): Gap healing und Remodeling wurden in beiden Cortices bewertet. Als Gap healing wurde das Einwandern von proliferierendem Kallusgewebe quer zum Cortex, während hingegen als Remodeling das Einsprossen von sogenannten „Cutting Cones“ [47] längs zum Cortex definiert wurde.

Bei den Fluoreszenzschnitten wurde nachstehendes Score- System verwendet, wobei grün die Intravital-Färbung mit Calceingrün, orange diejenige mit Xylenolorange und gelb/ ocker jene mit Tetracyclin repräsentiert (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Score- System Fluoreszenzschnitte

Wie ist die Verteilung von grün, orange und gelb/ocker in einem Gesichtsfeld bei 5facher Vergrößerung?			
0 keine	1 <50%	2 >50%	3 100%

Beurteilt wurden die Farbverteilungen im / respektive über dem Osteotomiespalt: plattennahes Periost, plattennaher Cortex, plattennahes Mark, plattenfernes Mark, plattenferner Cortex, plattenfernes Periost. Grün wurde mit dem I3 Filter (Anregungswellenlänge 450-490), orange mit dem N2.1. Filter (Anregungswellenlänge 515-560) und gelb/ocker mit dem BGR Filter (Anregungswellenlänge 420/30) betrachtet.

3.7.2.5 Statistik

Die gewonnenen Resultate wurden mithilfe eines Computerprogrammes (Statview®; Abacus, California, USA) statistisch analysiert. Die quantitativen Daten der Histomorphometrie und die Daten der semiquantitativen Scoresysteme wurden einem t-Test und einem Korrelations Z-Test unterzogen. Als statistisch signifikant wurden p-Werte <0.05 angesehen.

3.7.2.6 Qualitative Auswertung

Für die qualitative Auswertung wurden von Kossa gefärbte Dünnschnitte im Mikroskop der Firma Leica® (Leica®MDL 505097) betrachtet und nach Auftreten von enchondraler Ossifikation im Osteotomiespalt und umliegenden Kallus, Vorhandensein von Osteoklasten an den Osteotomieenden, sowie der allgemeinen Qualität des Kallusgewebes beurteilt.

4 Resultate

4.1 Operation

Die Operation konnte bei allen 24 Schafen wie geplant durchgeführt werden und die Anästhesie wurde von allen Tieren komplikationslos überstanden. Bei Schaf 1910 entstand am plattenfernen Cortex durch Abrutschen der Säge ein kleines Fragment. Bei Schaf 1911 wurde die Fraktur nicht ganz perfekt reduziert. Bei Schaf 1931 ist die zweitunterste Schraube beim Bohren als erste Schraube abgerutscht, weshalb die Platte weiter nach distal gerückt und ein neues Loch gebohrt werden musste. Bei Schaf 1933 entstand am plattenfernen Cortex eine kleine Absprengfraktur. Schaf 1935 hat relativ stark aus dem Gewebe geblutet, obwohl die Blutstillung mit dem Elektrokauter kontinuierlich vorgenommen wurde. Die Blutungen aus dem Knochenmark nach der Osteotomie können jedoch nicht mit dem Kauter gestillt werden, da die Blutgefässe sich sofort in das Markinnere zurückziehen.

4.2 Postoperative Phase

Bei Schaf 1907 wurde beim Castwechsel 23 Tage postoperationem eine leichte Bewegung auf Höhe der proximalen Tibia festgestellt. Darauf wurde ein Cast bis über das Knie gemacht und das Schaf noch bis zur planmässigen Schlachtung 4 Wochen postoperationem behalten.

Bei Schaf 1915 wurde beim Castwechsel 20 Tage postoperationem im Bereich der Osteotomie ein grosser Kallus palpiert.

Schaf 1919 hatte Schwierigkeiten, mit dem Cast aufzustehen. Es lag dementsprechend viel und frass wenig. Es wurde mehrmals täglich aufgestellt, frass dann Heu und bekam Kraftfutter zugefüttert. Mit dem Robert Jones Verband verbesserte sich die Bewegungsfähigkeit und ohne Verband war der weitere Verlauf komplikationslos.

Schaf 1921 wog 95 kg. Da zur Zeit der Operationen kein gewichtsmässig geeigneteres Schaf im richtigen Alter zur Verfügung stand, wurde es trotzdem operiert und danach zusätzlich in ein Suspensionssystem gebracht, um Heilungsschwierigkeiten wegen des übermässigen Gewichts vorzubeugen. Nach 3 Wochen wurde es abgehängt, jedoch in der Einzelboxe stehen gelassen. Die Belastung des operierten Beines war nicht zufriedenstellend. Auf dem Kontrollröntgen 4 Wochen postoperationem sah man, dass die Schraubenköpfe der ersten zwei Schrauben proximal der Osteotomie gebrochen und die Knochenenden verschoben waren. Daraufhin wurde es nochmals für 3 Wochen ins Aufhängesystem verbracht. 6 Wochen postoperationem wurden zusätzliche Kontrollröntgenaufnahmen gemacht, auf denen zu sehen war, dass ein deutlicher Kallus die Osteotomie inzwischen stabilisiert hatte. 7 Wochen postoperationem wurde das Tier aus dem Aufhängesystem entlassen und in eine Zweierboxe gebracht. Es trug bis zu Schlachttag einen Cast, schonte das Bein aber bis zum Schluss.

4.3 Schlachtung und makroskopische Befunde

4 Wochen-Gruppe :

Bei allen Schafen ausser bei 1913 war ein unterschiedlich grosser Kallus vorhanden, wobei sich die Spezialsägegruppe nicht von der Kontrollgruppe unterschied. Auch die Osteotomiestelle war bei allen Tieren noch sichtbar. Tendenziell war sie bei der Kontrollgruppe jedoch noch besser sichtbar als bei der Spezialsägegruppe. Das Periost erschien bei beiden Gruppen vorwiegend glänzend, bei je zwei Tieren der Gruppen wirkte es jedoch über dem Osteotomiespalt aufgeraut. Auch in der Menge der periostalen Blutungen unter der Platte unterschieden sich die beiden Gruppen nicht (siehe Abbildung 33).

Bei Schaf 1907 (Kontrollgruppe) und 1914 (Spezialsägegruppe) waren die Schraubenköpfe der ersten zwei Schrauben proximal der Fraktur abgebrochen. Die übrigen Schrauben bei Schaf 1907 waren locker. Bei Schaf 1912 (Kontrollgruppe) war die erste Schraube proximal der Osteotomie leicht gelockert. Insgesamt waren aber

die Implantate trotz der Schraubenlockerungen, vor allem über der Osteotomiestelle stabil.

12 Wochen-Gruppe:

Bei der Kontrollgruppe war tendenziell mehr Kallus vorhanden. Die Osteotomiestelle der Spezialsägegruppe war bei keinem Schaf mehr sichtbar. Im Gegensatz dazu war bei 3 Schafen der Kontrollgruppe die Stelle noch zu erkennen. Die zwei Gruppen unterschieden sich in punkto Sichtbarkeit der Osteotomiestelle signifikant ($p = 0.049$). Das Periost war bei beiden Gruppen vorwiegend glänzend (7 Tiere glänzend, 5 Tiere teilweise aufgeraut). Periostale Blutungen unter der Platte waren bei der Spezialsägegruppe tendenziell weniger vorhanden (siehe Abbildung 35 und Abbildung 37).

Bei Schaf 1921 (Kontrollgruppe) waren die Schraubenköpfe der ersten beiden Schrauben proximal der Fraktur abgebrochen. Bei Schaf 1922 (Kontrollgruppe) war die erste Schraube proximal der Fraktur gelockert. Bei Schaf 1932 (Spezialsägegruppe) waren alle Schrauben proximal der Osteotomie minimal gelockert.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass bei den beiden 4 Wochen-Gruppen keine wesentlichen Unterschiede bestanden, jedoch bei den beiden 12 Wochen-Gruppen die Heilung bei der Spezialsägegruppe makroskopisch weiter fortgeschritten war.

4.4 Radiologische Befunde

Bei den 4 Wochen-Gruppen waren keine signifikanten Unterschiede zu sehen. Bei je einem Schaf beider Gruppen waren 2 Schrauben gebrochen, was eine Dislokation der Frakturenenden zur Folge hatte. Die Reduktion der Fraktur postoperativ war bei den mit Spezialsägeblättern operierten Schafen ein wenig besser gelungen, obwohl am plattenfernen Cortex mehr Absprengungen entstanden waren. Endostal und periostal war im plattennahen Cortex bei der Kontrollgruppe mehr Kallus vorhanden. Der Osteotomiespalt war bei allen Schafen radiologisch noch sichtbar (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4).

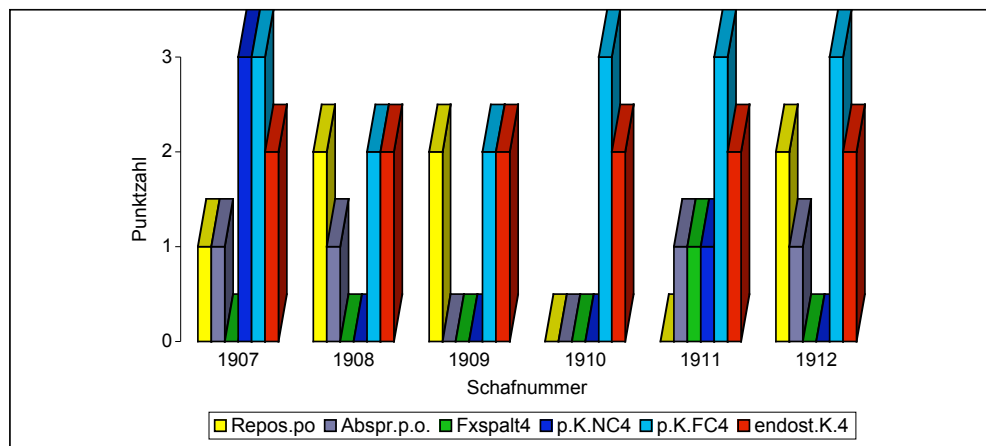


Abbildung 3: Auswertung der Röntgenaufnahmen 4 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 4

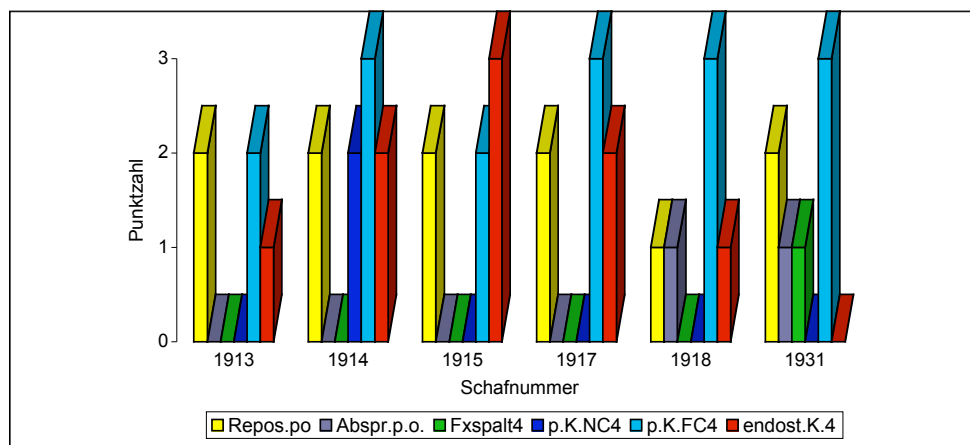


Abbildung 4: Auswertung der Röntgenaufnahmen 4 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 4

Bei den 12 Wochen-Gruppen ergab sich ein signifikanter Unterschied bei der Sichtbarkeit des Osteotomiespaltes 4 Wochen postoperativ. Bei der Spezialsägegruppe war der Osteotomiespalt bereits zu diesem Zeitpunkt kaum mehr zu sehen, während er bei der Kontrollgruppe noch besser zu finden war. Auch nach 12 Wochen (postmortal) war die Osteotomielinie bei der Kontrollgruppe noch besser sichtbar als bei der Spezialsägegruppe (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6).

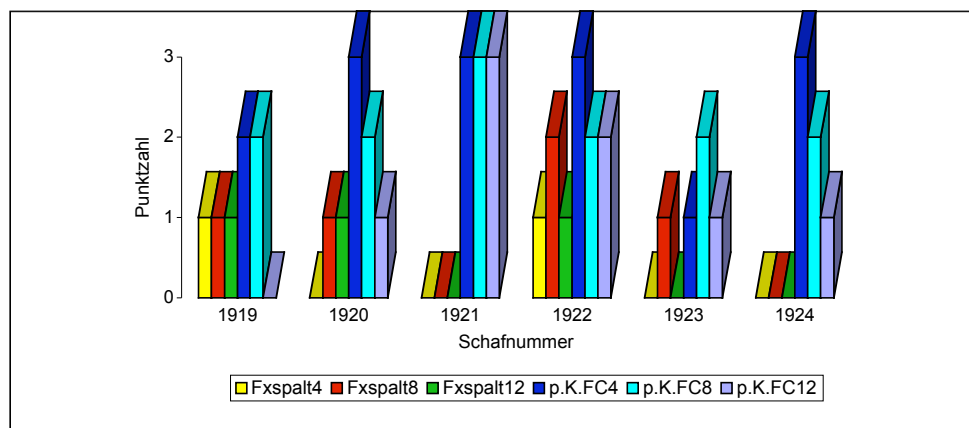


Abbildung 5: Auswertung der Röntgenaufnahmen 12 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 4 bezüglich Sichtbarkeit des Osteotomiespaltes und Menge des periostalen Kallus

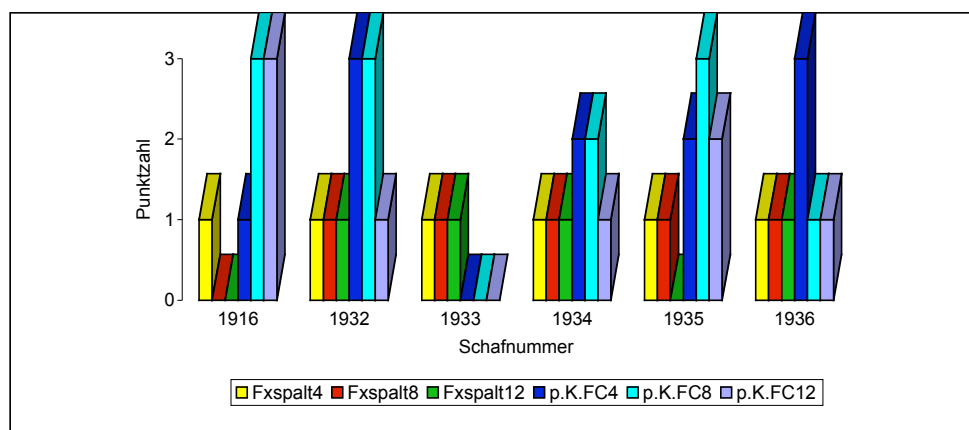


Abbildung 6: Auswertung der Röntgenaufnahmen 12 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 4 bezüglich Sichtbarkeit des Osteotomiespaltes und Menge des periostalen Kallus

Bei einem Schaf der Kontrollgruppe waren zwei Schrauben gebrochen, was zu einer leichten Dislokation der Fraktarenden führte, während bei einem anderen Schaf derselben Gruppe eine Lockerung der Schraube proximal der Osteotomie glücklicherweise zu keiner Dislokation führte. Auch bei den 12 Wochen-Gruppen wiesen die mit Spezialblatt gesägten Schaftibiae mehr Absprengungen am plattenfernen Cortex auf. Bei Schaf 1933 und 1936 war sogar eine kleine Längsfissur zu sehen. Periostal entstand bei der Kontrollgruppe etwas mehr Kallusgewebe (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8).

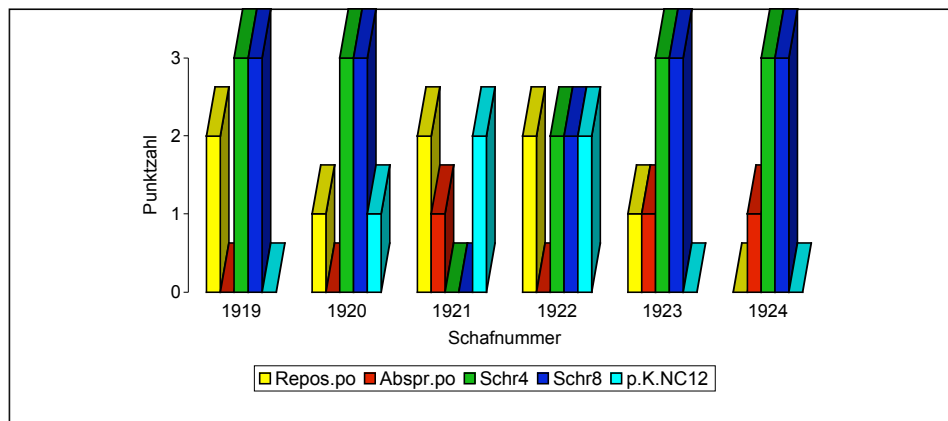


Abbildung 7: Auswertung der Röntgenaufnahmen 12 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 4 bezüglich Reposition, Absprengungen, Implantate und periostalem Kallus am plattennahen Cortex

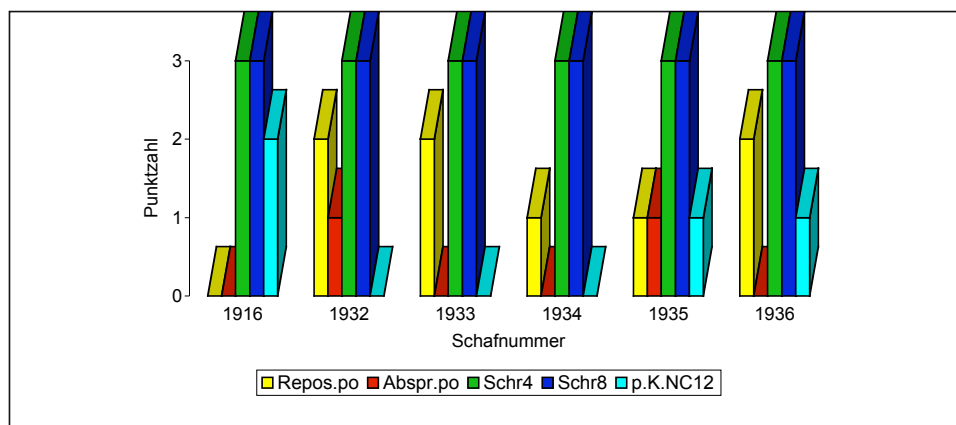


Abbildung 8: Auswertung der Röntgenaufnahmen 12 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 4 bezüglich Reposition, Absprengungen, Implantate und periostalem Kallus am plattennahen Cortex

Nach 8 Wochen war bei allen Tieren noch keine Restauration der Knochenmarkhöhle zu beobachten, während nach 12 Wochen bei 7 Schafen (4 der Kontroll- und 3 der Spezialsägegruppe) das Kallusgewebe in der Knochenmarkhöhle reduziert und diese zum Teil schon restauriert war (siehe Abbildung 9 und Abbildung 10).

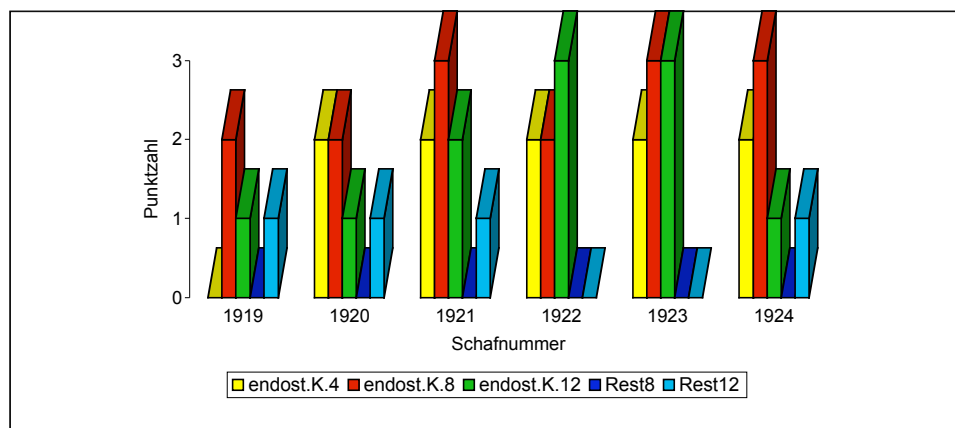


Abbildung 9: Auswertung der Röntgenaufnahmen 12 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 4 bezüglich endostalem Kallus und Restauration der Knochenmarkhöhle

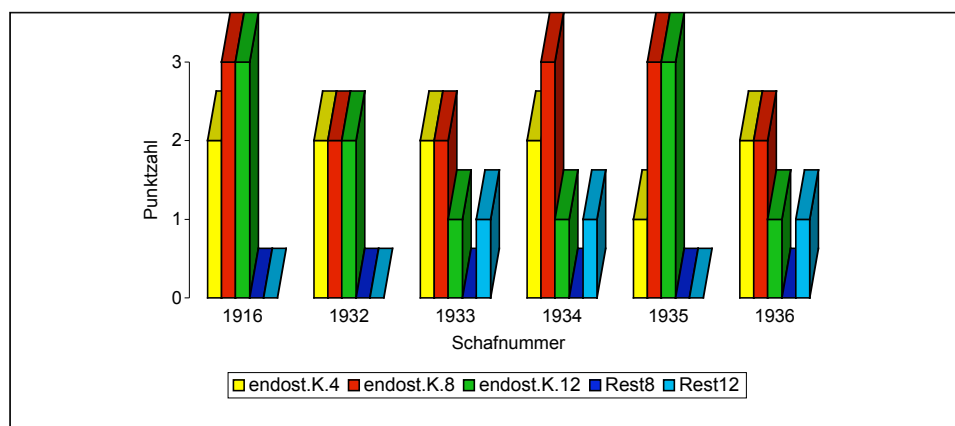


Abbildung 10: Auswertung der Röntgenaufnahmen 12 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 4 bezüglich endostalem Kallus und Restauration der Knochenmarkhöhle

4.5 Histomorphometrie

Anhand der Fuchsinsschnitte gab es sowohl bei den 4 Wochen als auch bei den 12 Wochen-Gruppen keine statistisch signifikanten Unterschiede hinsichtlich der gemessenen Fläche des vitalen Gewebes. Jedoch bestand bei den Cortices beider Gruppen im Vergleich eine klare Tendenz, dass bei der Spezialsägegruppe der 4 und den 12 Wochen-Gruppen mehr vitales Gewebe vorhanden war (siehe Tabelle 7, Tabelle 8, Abbildung 11 und Abbildung 12).

Schaf-Nr.	Code	VNC4w in %	VNgap4w in %	VFC4w in %	VFgap4w in %
1907	control	2.71	31.88	4.73	38.39
1908	control	4.75	60.25	3.59	37.37
1909	control	0.56	43.41	12.15	63.16
1910	control	3.12	78.88	4.97	100.00
1911	control	10.52	17.60	8.64	72.51
1912	control	3.42	68.55	6.17	77.25
Durchschnittswerte control		4.2 +- 3.4	50.1 +- 23.3	6.7 +-3.2	64.8 +- 31.3
1913	special	1.43	48.11	5.77	13.86
1914	special	24.12	0.85	6.36	74.26
1915	special	5.40	9.14	1.83	6.17
1917	special	9.41	52.19	15.08	68.88
1918	special	10.38	53.43	14.30	67.41
1931	special	10.35	37.42	4.52	21.95
Durchschnittswerte special		10.2 +- 7.8	33.5 +- 23.0	8.0 +- 5.4	42.1 +- 31.3

Tabelle 7: Auswertung der Histomorphometrie 4 Wochen-Gruppe

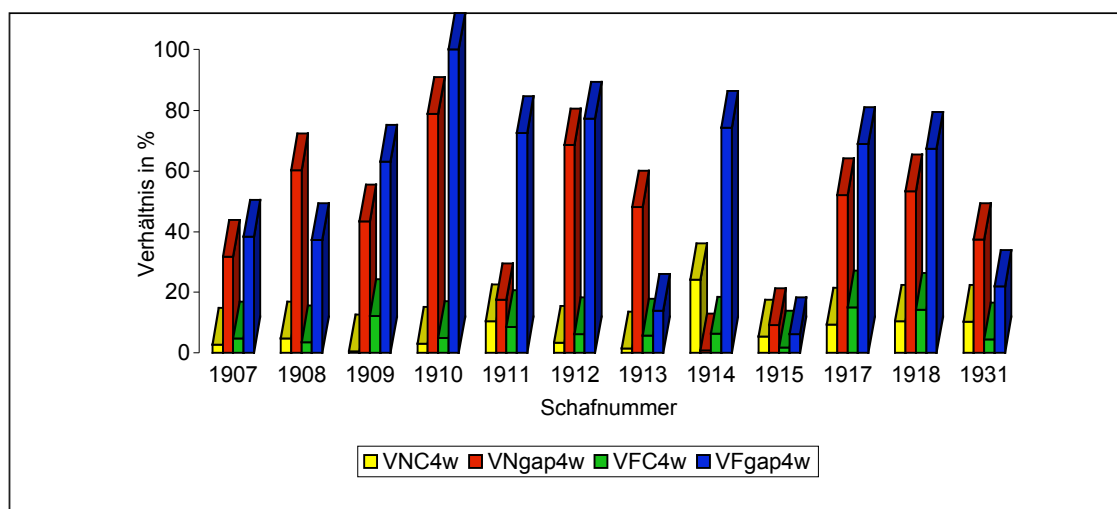


Abbildung 11: Auswertung der Histomorphometrie 4 Wochen-Gruppe

Schaf-Nr.	Code	VNC12w in %	VNgap12w in %	VFC12w in %	VFgap12w in %
1919	control	22.36	91.44	22.41	99.97
1920	control	31.25	100.00	40.40	100.00
1921	control	22.43	99.98	21.66	100.00
1922	control	30.76	100.00	37.84	100.00
1923	control	34.58	100.00	17.87	100.00
1924	control	23.66	100.00	23.65	100.00
Durchschnittswerte control		27.5 +- 5.3	98.6 +- 3.5	27.3 +- 9.4	100 +- 0.0
1916	special	47.34	100.00	45.59	100.00
1932	special	29.73	99.99	25.12	100.00
1933	special	51.84	100.00	53.10	100.00
1934	special	31.24	100.00	30.19	100.00
1935	special	17.93	100.00	35.94	100.00
1936	special	64.93	100.00	59.37	100.00
Durchschnittswerte special		40.5 +- 17.2	100 +- 0.0	41.6 +- 13.4	100 +- 0.0

Tabelle 8: Auswertung der Histomorphometrie 12 Wochen-Gruppe

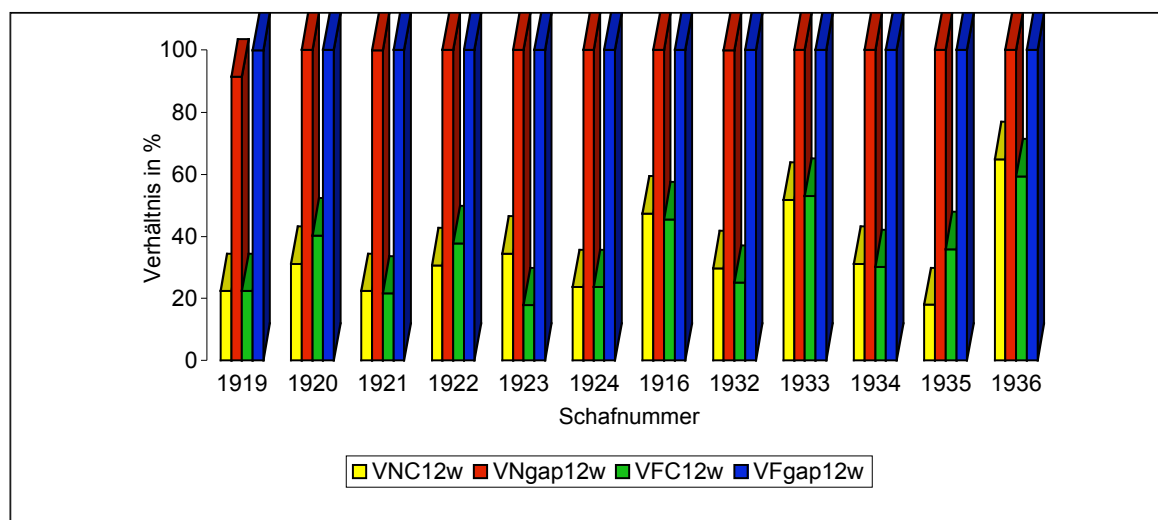


Abbildung 12: Auswertung der Histomorphometrie 12 Wochen-Gruppe

4.6 Semiquantitative Resultate der Histologien

Fuchsinschnitte:

Bei den 4 Wochen-Gruppen waren weder signifikante Unterschiede noch eine Tendenz der gewählten Beurteilungskriterien für eine Sägearart zu sehen (siehe Abbildung 13 und Abbildung 14). Weder Gap healing noch Remodeling waren weit fortgeschritten, viel eher schienen die Schnittflächen unverändert (siehe Abbildung 38).

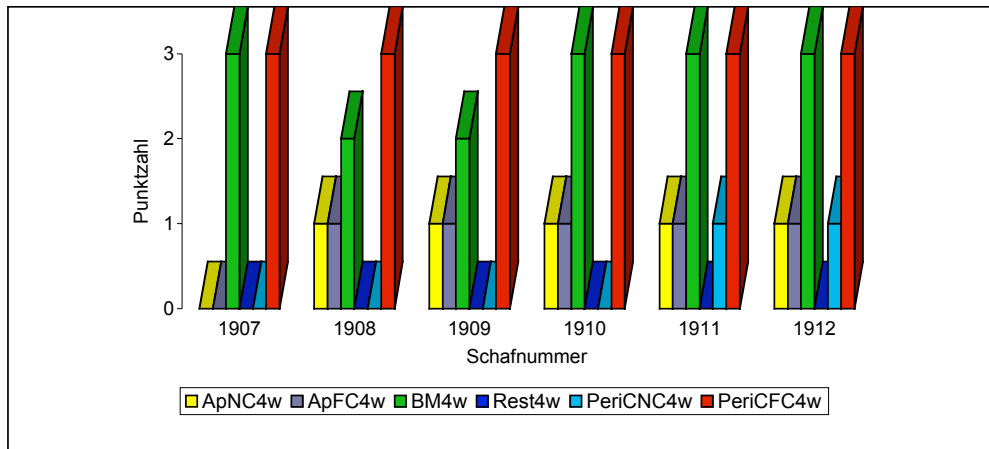


Abbildung 13: Auswertung der Fuchsinschnitte 4 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 5

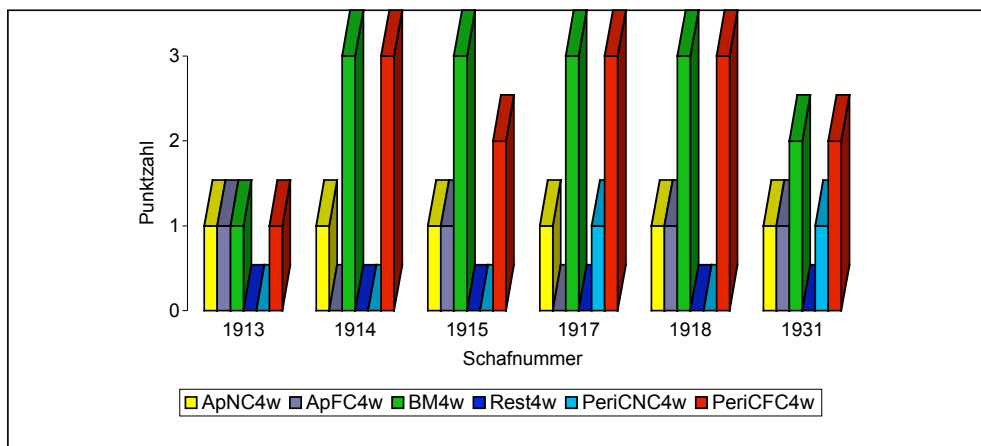


Abbildung 14: Auswertung der Fuchsinschnitte 4 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 5

Bei beiden 12 Wochen-Gruppen waren deutliche Fortschritte in der Knochenheilung zu sehen. Im Vergleich zu den 4 Wochen-Gruppen bestand jedoch ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen bei der Füllung der Knochenmarkhöhle mit Kallusgewebe und bei der Restauration der Knochenmarkhöhle. Bei der Spezialsägegruppe war die Knochenmarkhöhle vermehrt mit Kallusgewebe gefüllt, während bei der Kontrollgruppe die Restauration jedoch weiter fortgeschritten und deshalb weniger Kallusgewebe vorhanden war (siehe Abbildung 15 und Abbildung 16).

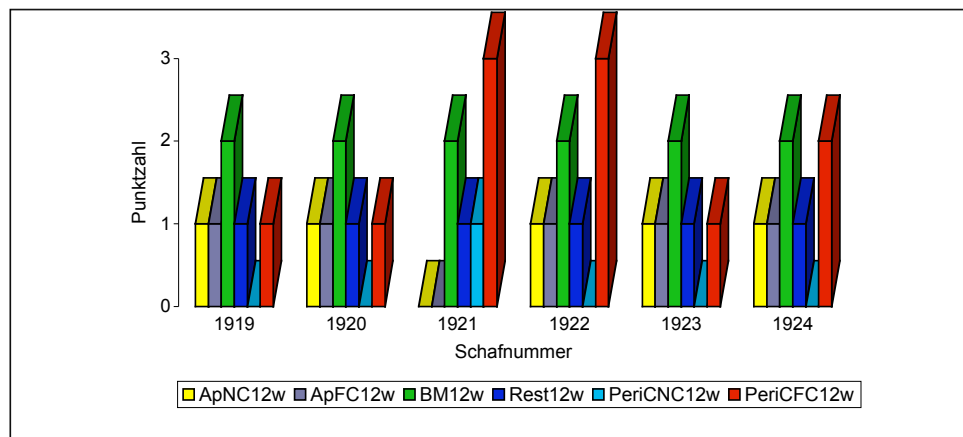


Abbildung 15: Auswertung der Fuchsinschnitte 12 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 5

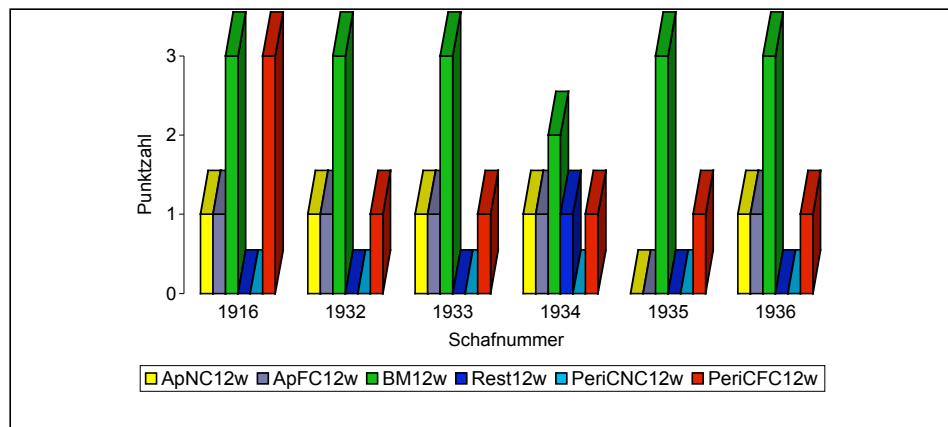


Abbildung 16: Auswertung der Fuchsinschnitte 12 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 5

Wenn auch nicht statistisch signifikante Unterschiede gefunden wurden, so konnten für die anderen Auswertungskriterien doch unterschiedliche Tendenzen aufgezeigt werden. Der periostale Kallus war sowohl im plattennahen als auch im plattenfernen Cortex bei der Kontrollgruppe tendenziell stärker ausgebildet, das Gap healing bei der Kontrollgruppe im Allgemeinen eher weiter fortgeschritten und das Gap healing wie auch das Remodeling im plattenfernen Cortex bei beiden Gruppen stärker ausgeprägt (siehe Abbildung 17 und Abbildung 18).

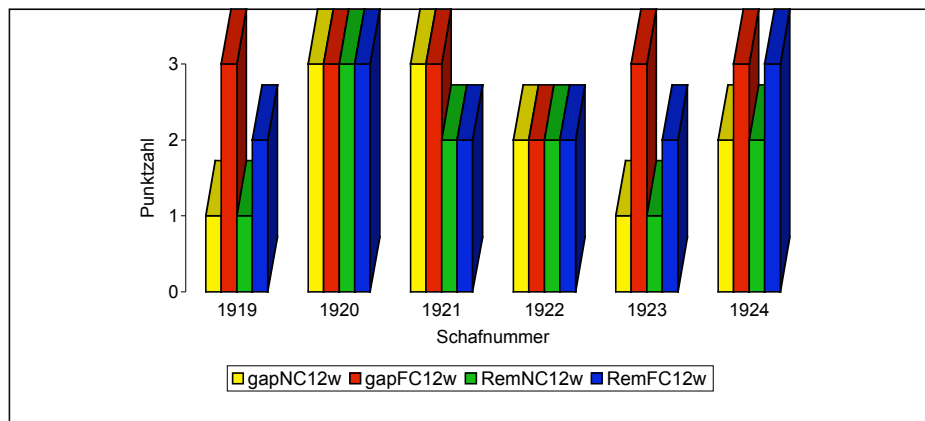


Abbildung 17: Auswertung der Fuchsinschnitte 12 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 5 bezüglich Gap healing und Remodeling

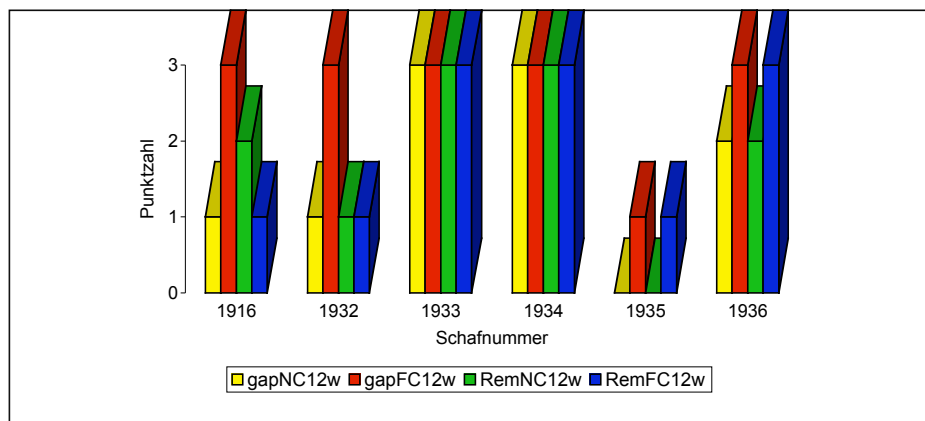


Abbildung 18: Auswertung der Fuchsinschnitte 12 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 5 bezüglich Gap healing und Remodeling

Fluoreszenzschnitte:

Bei den 4 Wochen-Gruppen stellten sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Aufnahme der Fluoreszenzfarbstoffe in die Knochenmatrix heraus. Lediglich bei der Knochenmarkhöhle bestand die Tendenz, dass die Spezialsägegruppe mehr fluoreszierende Farbe zeigte (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20).

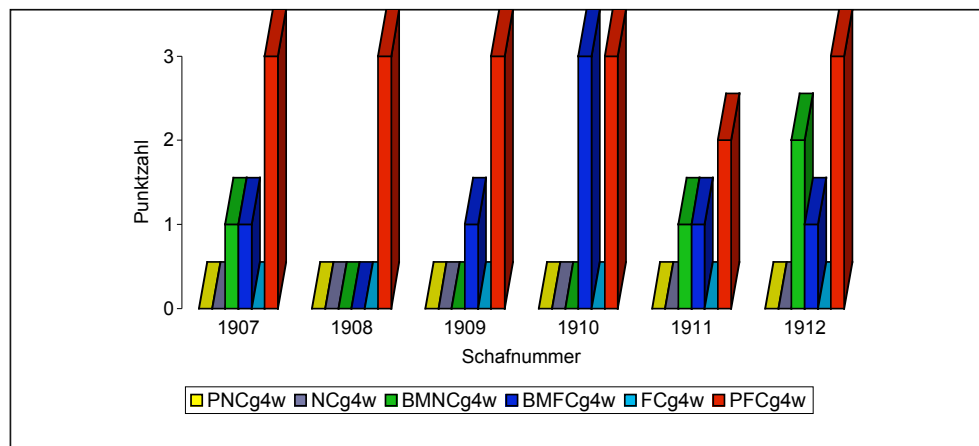


Abbildung 19: Menge des Calceingrüns 4 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 6

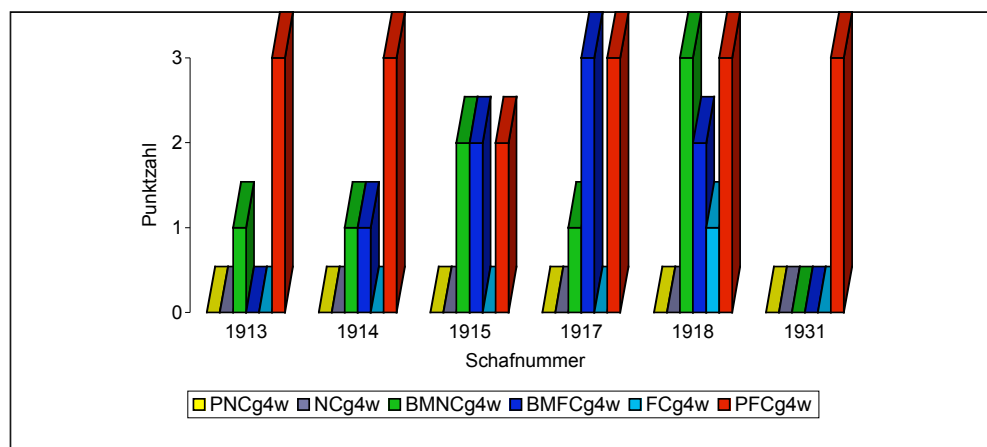


Abbildung 20: Menge des Calceingrüns 4 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 6

Auch bei den 12 Wochen-Gruppen wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede gefunden. Jedoch bestand ebenfalls die Tendenz, dass die Kontrollgruppe mehr Calceingrün gefärbtes Gewebe zeigte, allerdings mit Ausnahme der Lokalisationen Periost, plattennahen Cortex und plattenfernen Cortex (siehe Abbildung 21 und Abbildung 22).

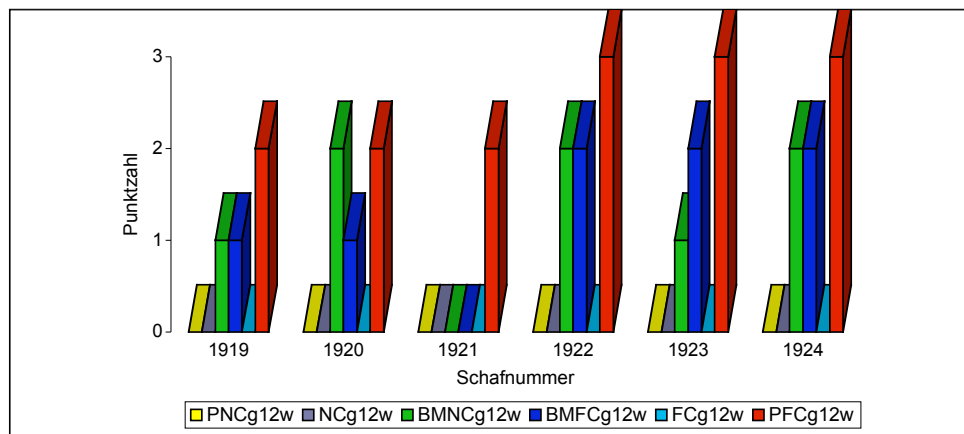


Abbildung 21: Menge des Calceingrüns 12 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 6

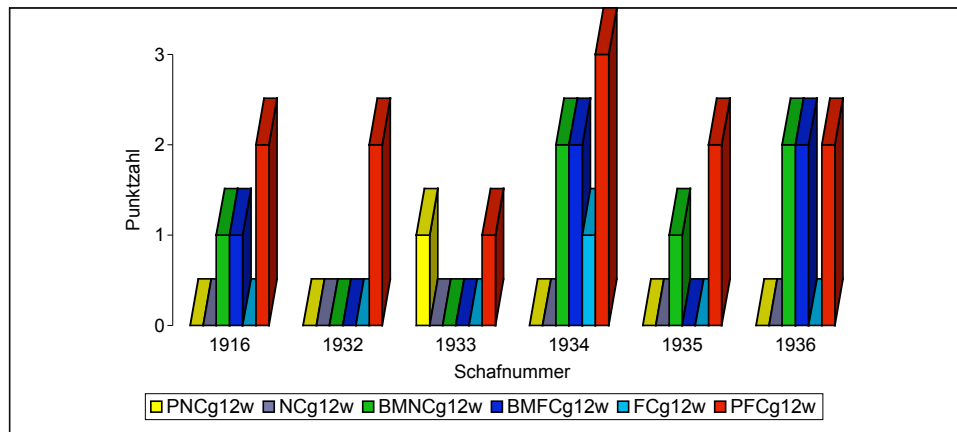


Abbildung 22: Menge des Calceingrüns 12 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 6

Die Spezialgruppe enthielt mehr Tetracyclin gefärbtes Gewebe in allen Regionen ausser in der Knochenmarkhöhle nahe dem plattennahen Cortex (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24).

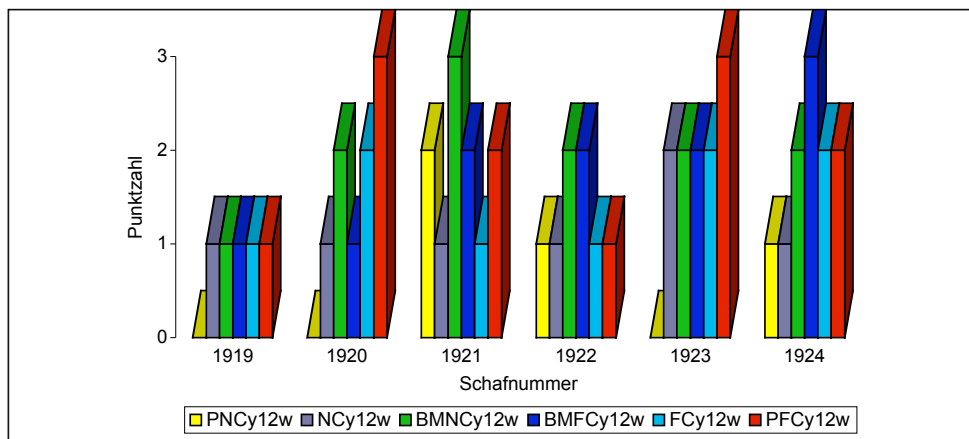


Abbildung 23: Menge des Tetracyclins 12 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 6

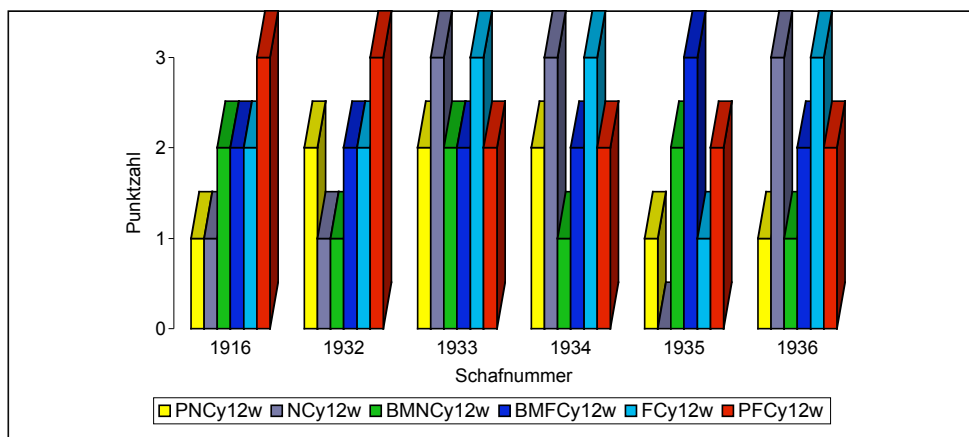


Abbildung 24: Menge des Tetracyclins 12 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 6

Xylenolorange war bei beiden Sägearten etwa gleich ausgeprägt vorhanden (siehe Abbildung 25 und Abbildung 26).

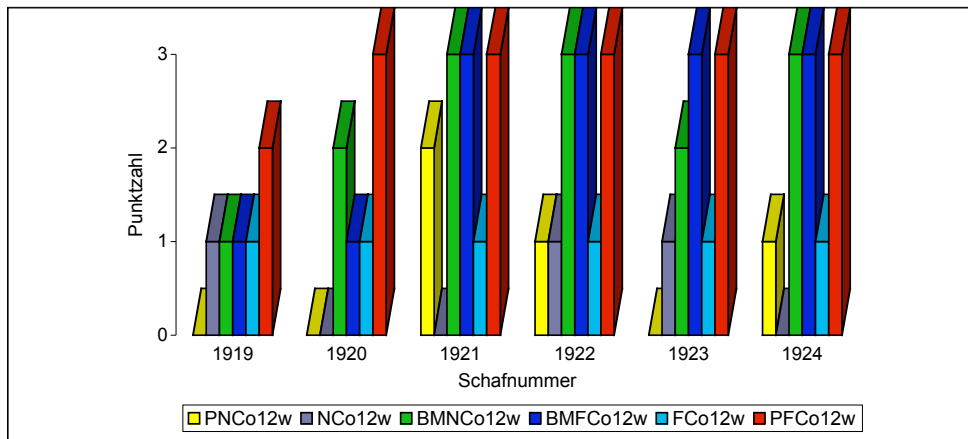


Abbildung 25: Menge des Xylenoloranges 12 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 6

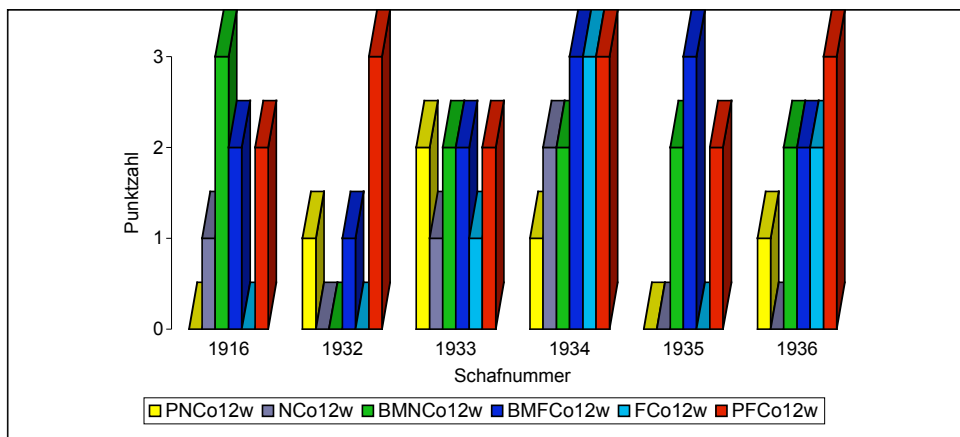


Abbildung 26: Menge des Xylenoloranges 12 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 6

Im Osteotomiespalt des plattenfernen Cortex war mehr Xylenolorange vorhanden als im plattennahen Cortex (siehe Abbildung 40), während Tetracyclin im plattennahen Osteotomiespalt häufiger zu sehen war. Im periostalen Kallusgewebe waren alle 3 Fluoreszenzfarbstoffe vorhanden (siehe Abbildung 41).

4.7 Qualitative Histologie

In den von Kossa gefärbten Dünnschnitten erscheint kalzifiziertes Gewebe schwarz, Knorpel violett und das restliche Gewebe türkis-blau.

4 Wochen-Gruppe:

Die Osteotomiespalten waren bei keiner der Proben mit Knochengewebe überbrückt, sondern relativ undifferenziertes Bindegewebe war darin enthalten. An den Knochenenden selbst wurden noch keine Anzeichen von Resorption oder Remodeling beobachtet (siehe Abbildung 43). Jedoch waren endostal und periostal an den corticalen Fragmentenden Osteoklasten pallisadenartig auf den mineralisierten Knochenflächen aneinandergereiht. Kallus füllte vor allem endostal die Knochenmarkhöhle. Auch periostal, und dort vermehrt auf der plattenfernen Seite, wurde Kallusgewebe gefunden. Periostal waren grössere Areale enchondraler Ossifikation, endostal hingegen nur kleine Gebiete davon zu sehen. Das Kallusgewebe selbst bestand aus Geflechtknochen, der viele aktive Lakunen mit Osteoidbildung und Zwischengewebe aus Mesenchymal- und Osteoblastenprogenitorzellen enthielt. Abgesehen vom Kallusgewebe in der Knochenmarkhöhle auf Höhe der Osteotomie war normales Knochenmark mit Fett- und Blutzellen vorhanden. Wenige Megakaryoblasten waren zu sehen.

Bei Schaf 1907 (Kontrollgruppe) war deutlich mehr enchondrale Ossifikation zu sehen. Bei Schaf 1918 (Spezialsägegruppe) hatte an den Frakturenden die Resorption begonnen.

12 Wochen-Gruppe:

Grundsätzlich zeigte sich ein ähnliches Bild wie bei den 4 Wochen-Gruppen. Der Kallus war endostal und periostal konsolidiert und das Knochenmark befand sich in Rekonstitution (siehe Abbildung 45). Enchondrale Ossifikation war nicht mehr zu sehen mit Ausnahme von Schaf 1921 (Kontrollgruppe) bei dem periostal im plattenfernen Kallus und Schaf 1916 (Spezialsägegruppe) bei dem endostal noch kleine Knorpelbereiche sichtbar waren. Vor allem im plattenfernen Cortex hatten sich longitudinal bereits Haver'sche Kanäle gebildet und Cutting Cones [48] wurden quer zur Osteotomielinie gefunden (siehe Abbildung 46). Die Frakturenden waren zum Teil,

vor allem im plattenfernen Cortex, nicht mehr eindeutig identifizierbar (siehe Abbildung 44).

Bei Schaf 1933 (Spezialsägegruppe) war das Knochenmark völlig rekonstituiert und längs zur Knochenachse sehr viel Remodeling erkennbar. Im Gegensatz dazu, waren bei Schaf 1935 (Spezialsägegruppe) die Osteotomiespalten sowohl im plattennahen, als auch im plattenfernen Cortex gar nicht überbrückt und die Markhöhle noch vollständig mit Kallusgewebe gefüllt. Bei Schaf 1920 (Kontrollgruppe) waren viele Osteoklasten in der Knochenmarkhöhle zu finden, die den Kallus abbauten.

4.8 Korrelationen

Bei den beiden 4 Wochen-Gruppen gab es nur wenige signifikante Korrelationen. Die Menge Calceingrün in der Knochenmarkhöhle korrelierte mit der Menge Kallusmaterial in derselben ($p=0.014$). Eine negative Korrelation wurde zwischen der Apposition und dem periostealen Kallus gefunden: je besser die Apposition im plattennahen Cortex, desto weniger periostaler Kallus wurde gebildet ($p=0.001$).

Bei den beiden 12 Wochen-Gruppen gab es mehrere signifikante Korrelationen. Die Apposition postmortem im plattennahen Cortex korrelierte zu 100% mit der Apposition im plattenfernen Cortex ($p<0.0001$). Wie bei den 4-Wochen-Gruppen bestand eine negative Korrelation zwischen der Apposition im plattennahen Cortex und dem periostalen Kallus ($p=0.014$). Die histologische Kallus-Beurteilung im plattenfernen Cortex korrelierte mit der makroskopischen Beurteilung des Gesamtkallus ($p=0.008$) und mit der radiologischen Beurteilung der Kallusmenge ($p=0.002$). Die Menge an endostalem Kallus korrelierte negativ mit der Restauration der Knochenmarkhöhle, sowohl in der radiologischen ($p<0.0001$) als auch in der histologischen ($p<0.0001$) Auswertung. Gap healing und Remodeling korrelierten ($p<0.0001$), wie auch die Menge Xylenolorange ($p=0.002$) und Tetracyclin ($p=0.046$) zum Remodeling. Auch die berechneten Verhältnisse vitales zu (vitalem + nicht vitalem) Gewebe korrelierten mit dem Remodeling ($p=0.039$) und dem Gap healing ($p=0.028$). In der Histomorphometrie korrelierten sowohl die Verhältnisse im Gap (<0.0001) als auch im Cortex ($p=0.001$) je

miteinander. Auch bei der Fluoreszenz korrelierte die Menge Xylenolorange im plattennahen Cortex mit derjenigen im plattenfernen Cortex ($p=0.016$). Dasselbe galt fürs Tetracyclin ($p=0.0001$). Für das Calceingrün ergab sich eine negative Korrelation, indem im Periost des plattennahen Cortex gar kein Calceingrün vorhanden war, jedoch im Periost des plattenfernen Cortex eine beträchtliche Menge grün gefärbtes Gewebe gesehen wurde ($p=0.025$). Die radiologische Sichtbarkeit des Osteotomiespaltes nach 8 Wochen korrelierte positiv mit derjenigen nach 12 Wochen ($p=0.017$). Die periostale Kallusmenge im plattenfernen Cortex nach 8 Wochen korrelierte mit derselben nach 12 Wochen ($p=0.012$).

5 Diskussion

In dieser Studie wurde der Einfluss von zwei verschiedenen Sägeblättern auf die Knochenheilung nach einer Osteotomie mit der oszillierenden Säge beurteilt. Die Sägeblätter unterschieden sich durch die Anordnung der Zähne und die Geometrie des Sägeblattschaftes. Beide Eigenschaften hatten ein unterschiedliches Spanverhalten während des Sägens zur Folge. Der Vergleich der Sägeblätter zeigte, dass es nach Osteotomien des Tibiaschaftes von Schafen mit beiden Sägeblättern grundsätzlich zu einer guten Knochenheilung innerhalb von 12 Wochen kam, wobei sich die Knochenheilung in beiden Gruppen nach 4 Wochen wenig unterschied, während nach 12 Wochen die Knochenheilung bei den Tieren der Spezialsägegruppe hinsichtlich der Überbrückung des Osteotomiespaltes und des Remodelings weiter fortgeschritten war.

5.1 Versuchsmodell

Das Schaf wurde bereits in vielen Untersuchungen als Modell zum Studium der Frakturheilung und zur Evaluation neuer Osteosyntheseverfahren eingesetzt [11, 39, 40, 43, 47]. Die Knochenphysiologie des Schafes wie auch das Körpergewicht ist mit dem Menschen weitgehend vergleichbar [41]. Vorteilhaft ist auch der beim Schaf konstant ablaufende knöcherne Regenerationsprozess, wobei die Geschwindigkeit der ablaufenden Heilungsvorgänge am ehesten mit der menschlichen Knochenregeneration zu vergleichen ist [3]. Dies gilt jedoch nur für erwachsene Schafe, da das Regenerationspotential junger, sich noch im Wachstum befindlichen Tiere wesentlich höher ist [41]. Deshalb wurden für diese Studie 2 bis 4 jährige Schafe verwendet. Die Tibia des Schafes steht wie beim Menschen in der Tragachse des Beines und bietet daher sehr gute Vergleichsmöglichkeiten für Versuche unter funktioneller Belastung [32, 33, 52]. Zudem belasten Schafe in der Regel die operierte Extremität direkt nach der Operation [41] im Gegensatz zu Hunden, die das verletzte Bein schonen. Durch die Schreckhaftigkeit und Scheu der Schafe kann es jedoch zu abrupten Bewegungen und Überbelastung kommen. Deshalb und um schädlichen Torsionsbewegungen

entgegen zu steuern wurden die Schafe für die ersten 6 Wochen zusätzlich mit einem Stützverband versehen. Diese Massnahmen waren erfolgreich, da im Gegensatz zu einer anderen Studie [53] keine Spontanfrakturen auftraten.

5.2 Operation und weiterer Verlauf

Die Operation verlief bei allen Tieren komplikationslos und die Tibiae konnten mit beiden Sägeblättern durchgeschnitten werden. Das an der Säge befestigte Gewicht (siehe Abbildung 27) hatte sich gut bewährt, da die Führung einfacher und der Druck des Sägeblattes auf den Knochen während des Sägevorganges immer gleich stark war. Während des Schneidens wurde die Schnittfläche ständig mit Kochsalzlösung gekühlt. Klinisch zeigt sich ohne Kühlung eine Rauchentwicklung und eine Carbonisation des Knochens, was bedeutet, dass durch eine Kühlung mit Kochsalzlösung die Temperatur erheblich reduziert werden kann [22]. Da die Temperaturmessung *in vivo* durch Anbringen zusätzlicher Geräte einen weiteren Eingriff und damit mögliche Störungen für die erwartete Knochenheilung bedeutete, wurde auf eine Messung verzichtet. Diese sollte zu einem späteren Zeitpunkt an Kadaverknochen nachgeholt werden.

Das Spezialblatt produzierte einen sehr feinen Schnitt am Knochencortex. Die Aussparung im Schaft des Sägeblattes erschwerte die Handhabung während des Sägevorganges. Durch die spezielle Geometrie war weniger Führungsfläche gegeben und deshalb entgleiste die oszillierende Säge häufiger zur Seite, was öfter als beim Kontrollsägeblatt zu kleinen Absprengungen am plattenfernen Cortex führte. Durch die Aussparung im Schaft konnten Knochendebris deutlich besser weggeführt werden, was zu einer weniger grossen Kontaktfläche und sekundär zu einer geringeren Reibung führte. Es wurden früher schon verschiedene Methoden getestet, bei denen ein Instrument zur Führung der Säge eingesetzt wurde. Probleme ergaben sich jedoch mit der Abführung von Debris und der Verwinkelung des Sägeblattes im Führungsinstrument [38].

Für die Kompression der Osteotomie wurde trotz der speziellen Geometrie der DCP ein Plattenspanner verwendet, um eine möglichst standardisierte Kompression über den gesamten Osteotomiespalt und einen annähernd gleichen Abstand der Knochenenden zueinander zu erreichen. Je nach Reposition der Knochenenden wies aber der Osteotomiespalt doch noch unterschiedliche Breiten auf. Auch ein geübter Chirurg wird trotz standardisiertem Operationsverfahren nicht in jedem Falle eine identische Reposition erreichen können, da durch die individuelle Form der Knochen die Anpassung der Platten nicht immer gleich gut gelingen wird. Optimal wäre ein vollständiges Aneinanderliegen der Knochenenden, was bei den meisten Tieren in dieser Studie auch gelang. Eine gewisse Variabilität in der Reduktion von Frakturen entspricht auch dem klinischen Alltag.

Die Implantate haben bis auf wenige Schraubenbrüche gehalten. Bei Schaf 1921 (Kontrollgruppe) war der Schraubenbruch auf das hohe Gewicht von 95kg im Verhältnis zur verwendeten dünnen 3.5 mm DC-Platte zurückzuführen. Schafe haben im Verhältnis zu ihrem Körpergewicht relativ dünne und brüchige Knochen. Die Plattenstärke ist für dieses Gewicht deshalb ziemlich klein. Durch einen zusätzlichen Stützverband konnte die Stabilität genügend verbessert und ein Implantatbruch verhindert werden.

Bei den Schafen 1907 (Kontrollgruppe) und 1914 (Spezialsägegruppe) spielten vermutlich nebst den Gewichtsproblemen auch andere Punkte eine Rolle. Da die Schrauben nicht in einer geraden Linie im Knochen inseriert werden sollten um keine Fissur im Gegenkortex zu provozieren, mussten die Schrauben vor allem in der Nähe des Osteotomiespalt relativ schräg in die Platte eingeführt werden. Dies kann zu übermässigen Scherkräften im Bereich des Schraubenkopfes führen, welche bei den beiden oben genannten Schafen mit für die Schraubenbrüche verantwortlich waren.

5.3 Probenaufbereitung und -auswertung

Die Aufbereitung der Proben war gut durchzuführen. Die Vitalfärbung mit Fuchsin und die Fluoreszenzmarkierung ergaben gute Resultate.

Beim Sägen mit der Innenlochsäge brachen einige der für die Fluoreszenzuntersuchung vorgesehenen, relativ dünnen 50µm Schnitte während des Sägevorganges und die Schnitte mussten wiederholt werden. Dies führte dazu, dass bei 4 Proben für den Dünnschnitt nur noch Cortex und kein Mark mehr vorhanden war. Waren die Proben etwas schräg eingespannt worden, wie es bei 3 Fuchsinproben und 2 Dünnschnitten der Fall war, konnte auf einer Seite der Osteotomielinie noch Knochenmark entdeckt werden, auf der anderen Seite jedoch nicht mehr. Die Schnitte konnten aber dennoch für die Auswertung verwendet werden, da keiner so schlecht geschnitten war, dass er von der Studie ausgeschlossen werden musste.

Für die Histomorphometrie war es bei der 12 Wochen-Gruppe manchmal schwierig, die Bereiche Gap und Cortex zu definieren, weil der Osteotomiespalt wegen des starken Remodeling oft nicht mehr klar abgrenzbar war (siehe Abbildung 39). Demzufolge wurde an der vermuteten Stelle jeweils nur ein hauchdünnes Gap markiert. Die dadurch entstandene Ungenauigkeit in der Histomorphometrie wurde aber als gering eingestuft und dürfte das Endergebnis der Auswertung nicht massgeblich beeinflusst haben.

Bei den semiquantitativen Bewertungen (Fuchsin Schnitte, Fluoreszenz Schnitte und Röntgenbilder) wurden keine sehr feinen Abstufungen, sondern nur relativ grosse Kategorien der Scores gewählt. Zum einen geschah dies aus der Überlegung heraus, dass das menschliche Auge und Gehirn nicht fähig wäre eine sehr feine Unterscheidung vorzunehmen und somit eine grobe Einteilung weniger Fehler aufweisen wird. Zum anderen wäre bei der kleinen Tierzahl der einzelnen Gruppen auch kaum eine sinnvolle Auswertung möglich gewesen.

Die Resultate entsprechen somit eher einer Übersicht und stimmen nicht zwingend fürs Detail, jedoch erlaubte diese Einteilung Unterschiede des Einflusses der beiden Sägeblätter auf die Knochenheilung hinsichtlich der gewählten histologischen Kriterien auszuarbeiten.

Bei den dreifach markierten Fluoreszenzschnitten war es schwierig, das grün des Calceigrüns und das gelb/ocker des Tetracyclins zu unterscheiden. Als Kriterium für Tetracyclin galt, dass es immer als innerstes am Osteoid angelagert war (siehe Abbildung 42), da es als letzter Marker injiziert wurde, und dass es bei der Betrachtung mit dem I3 Filter (Anregungswellenlänge 450-490) nicht fluoreszierte.

5.4 Radiologie

Die Röntgenkontrolle in 4 wöchigen Abständen hatte sich bewährt.

Die Kontrollgruppe zeigte vermehrt periostalen Kallus. Bei der Spezialsägegruppe waren am plattenfernen Cortex mehr Absprengungen zu sehen als bei der Kontrollgruppe, wobei bei der Verteilung der Scores nur bewertet wurde ob Absprengungen vorhanden waren oder nicht. Die Grösse der Splitter wurde nicht mit einbezogen. Das vermehrte Auftreten von Absprengungen bei der Spezialsägegruppe war vermutlich auf die schwierigere Handhabung zurückzuführen, da die Aussparung im Schaft des Spezialsägeblattes zu verminderter Führungsstabilität führt.

5.5 Histologie

Nach 4 Wochen waren zwischen den beiden Sägegruppen kaum Unterschiede vorhanden. Nach 12 Wochen jedoch, war bei der Spezialsägegruppe eine Tendenz für eine fortgeschrittenere Heilung zumindest im Bereich des Cortex zu sehen.

Bei allen Schafen war mehrheitlich eine sogenannte sekundäre oder indirekte Frakturheilung zu beobachten. Auf der plattenfernen Seite war im Allgemeinen mehr Kallus zu finden. Der Kallus kann einerseits durch geschädigtes Periost entstehen, andererseits durch Mikroinstabilität, wobei die Knochenheilung gestört wird und möglicherweise eine non-union entsteht [12]. Da bei unseren Tieren weder Anzeichen gestörter Knochenheilung noch Implantatversagen zu finden war und vor der Osteotomie das Periost um die vorgesehene Schnittstelle weggehoben wurde, ist es wahrscheinlich, dass der Kallus vom geschädigten Periost herrührte. Das Periost

wurde zum Einsetzen von Retraktoren, die dem Schutz der Weichteile und vor allem der Arteria tibialis dienten, mit Hohmannhebeln vom Knochen weggehoben. Dazu passte auch, dass der Kallus sehr geordnet und gut abgegrenzt aussah und nichts auf einen Irritationskallus hinwies.

Bei einer stabilen Fixation von Spontanfrakturen kann eine Primärheilung erfolgen [15, 16, 42, 43, 48]. Durch die Osteotomie mit der Säge entsteht in jedem Falle Wärme, welche zusätzlichen Anreiz zur Kallusbildung geben mag. In dieser Studie wurde die Temperatur während des Sägevorganges nicht gemessen. Es spricht aber einiges dafür, dass bei den mit Spezialsägeblatt operierten Schafen durch die spezielle Geometrie weniger Wärme produziert und somit weniger Schaden im Knochen angerichtet wurde, weshalb es auch zu weniger Kallus kam. Da bei allen Proben eine Spalt- und keine Kontaktheilung zu finden war, stellt sich die Frage, ob entweder zu wenig Kompression bei der Reduktion verwendet wurde oder bei beiden Sägeblättern die Wärmeentwicklung dafür verantwortlich gewesen war. Die Kompression wurde als genügend erachtet, da diese nach den Angaben der Hersteller des Plattenspanners bis zum idealen, grünen Bereich beim Anziehen durchgeführt wurde. Zusätzlich wurde jeweils noch das erste Schraubenloch exzentrisch gebohrt. Makroskopisch schien die Reduktion in den meisten Fällen perfekt zu sein und der Osteotomiespalt war fast vollständig verschwunden, wie es in klinischen Fällen nur selten gelingt. Deswegen liegt der Schluss nahe, dass eventuell das mechanische Abtragen der Knochenspäne ein vollständiges Aneinanderpassen der Fraktarenden verhindert hatte und dies zusammen mit der Wärmeentwicklung während des Sägevorganges für das Fehlen der primären Knochenheilung im Osteotomiespalt verantwortlich war.

Fluoreszenz

Bei der Kontrollsägegruppe war nach 12 Wochen generell noch mehr Calceingrün und bei der Spezialsägegruppe mehr Tetracyclin vorhanden. Letzteres wird als letzter Marker vermehrt an der Knochenoberfläche eingebaut.

Daraus lässt sich schliessen, dass bei den Schafen der Spezialsägegruppe die Heilung insgesamt weiter fortgeschritten war und das ursprünglich eingebaute Calceingrün im Remodelingprozess bereits wieder abgebaut wurde. Die Ergebnisse der Fluoreszenzmikroskopie bestätigen bereits früher gemachte Beobachtungen, dass

in den ersten 4 Wochen nach einer Fraktur in den kortikalen Fakturrenden relativ wenig passiert und die Knochenheilung vor allem durch das Periost und Endost vorwärts getrieben wird [41, 43]. Danach scheint nach einer ersten Resorptionsphase vor allem die Überbrückung des Osteotomiespaltes durch Gap healing und das Remodeling des Osteotomiespaltes zu einer Heilung nach ca. 12 Wochen zu führen. Die in dieser Osteotomie-Studie erhaltenen Resultate unterscheiden sich nicht massgeblich von bereits früher publizierten Ergebnissen [13, 53], dort war eine histologische Knochenheilung bei Schafen erst nach 12 Wochen zu erwarten. Daraus lässt sich ableiten, dass sich die histologische Knochenheilung mit beiden Sägeblättern im Bereich der Norm befindet.

Fuchsinschnitte

Das Gap healing und das Remodeling war bei der 12 Wochen-Gruppe im plattenfernen Cortex stärker ausgeprägt, was zu erwarten war. Es ist bekannt, dass am Knochen vollständig anliegende Metallplatten die Knochenheilung im plattennahen Cortex etwas verzögern. Was ursprünglich als „Stress Protection“ einer verminderten mechanischen Belastung des Knochens unter der Platte und damit einem erniedrigten Anreiz zur Knochenheilung zugeschrieben wurde [14, 20], konnte inzwischen als Folge einer verminderten Vaskularität nachgewiesen werden [19]. Es ist sehr wahrscheinlich, dass auch in dieser Studie unter der Platte die Vaskularisation leicht vermindert und somit die Heilung im plattennahen Cortex verzögert wurde. Warum die Kontrollgruppe die Tendenz hatte, im plattenfernen Cortex mehr Remodeling und Gap healing zu zeigen als die Spezialsägegruppe kann nicht abschliessend beurteilt werden. Es könnte lediglich mit der stärkeren Kallusproduktion in diesem Bereich in Verbindung gebracht werden.

5.6 Korrelationen

Gesamthaft gab es vor allem bei den 12 Wochen-Gruppen zufriedenstellende Korrelationen. Die verschiedenen Untersuchungsmethoden führten zu vergleichbaren Resultaten. Die Menge Fluoreszenzfarbstoffe entsprach dem Remodeling, respektive

dem Gap healing und der Menge fuchsingefärbtem Gewebe. Auch die Kallusmengen waren in der Histologie und in der Radiologie vergleichbar. Leider hatten gleiche Parameter nicht in jedem Falle vollständig miteinander korreliert. Somit wurde ersichtlich, dass bei einer semiquantitativen Beurteilung von Resultaten auch bei grösstem Bemühen die Punktegabe immer durch subjektive Wahrnehmung beeinträchtigt wird. In der vorliegenden Studie wurde immerhin versucht, durch objektive und subjektive Bewertungen ein möglichst wahrheitsgetreues Resultat zu erhalten.

5.7 Statistik

Die relativ niedrige Anzahl von Tieren pro Gruppe ist bei der zu erwartenden biologischen Variabilität innerhalb der Gruppen sowie auch Unterschiede zwischen den Gruppen sicherlich dafür verantwortlich, dass nur wenig statistisch signifikante Unterschiede gefunden wurden. Hätte man eine grössere Tierzahl operiert und damit eine statistisch bessere Normalverteilung erreicht, wären die bei der vorliegenden Studie gefundenen Tendenzen zumindest deutlich verstärkt worden, wenn nicht sogar statistisch signifikant unterschiedlich erschienen. Ethische Überlegungen hinsichtlich Tierschutz und Anzahl der dafür verwendeter Tiere pro Gruppe verbieten jedoch diese Tierzahlerhöhung. Trotzdem konnten aus den Resultaten für die Klinik relevante Schlussfolgerungen gezogen werden.

5.8 Schlussbeurteilung

In beiden Sägegruppen kam es zu guten Ergebnissen. Die vielen kleineren und grösseren Absprengfrakturen zeigten, dass die Handhabung der Säge hinsichtlich der Biegsamkeit des Sägeblattes nicht immer ganz einfach war und bei der Produktion von zukünftigen Sägeblättern in Betracht gezogen werden müsste. Der Unterschied in der Knochenheilung zeigte sich vor allem in der Zeitperiode zwischen 4 und 12 Wochen, wo im Grossen und Ganzen die Knochenheilung bei der Spezialsägegruppe weiter fortgeschritten war als bei der Kontrollsägegruppe. Dieser Zeitraum entspricht auch

der Phase, wo Fehler der Fixation deutlich werden, bzw. Implantatlockerungen oder -brüche beobachtet werden. Wird die Knochenheilung in der Phase durch eine schonendere Sägetechnik begünstigt, sollte dem in Zukunft bei Korrekturosteotomien oder auch beim Einsetzen von Prothesen vermehrt Beachtung geschenkt werden.

5.9 Zukunfts-Perspektiven

Um die Handhabung und Führung des Spezialsägeblattes zu verbessern, wurde die Aussparung im Schaft des Blattes verkleinert und in drei kleinere Löcher unterteilt, womit das Blatt erheblich stabiler wurde. Der Einfluss dieser technischen Veränderung, sowie derjenige der Sägeblattdicke sollte in zukünftigen Studien noch eingehender untersucht werden, sowie der Effekt dieses Spezialsägeblattes auf die Knochenheilung zu einem Zwischen-Zeitpunkt von 8 Wochen.

6 Abbildungen

6.1 Operation

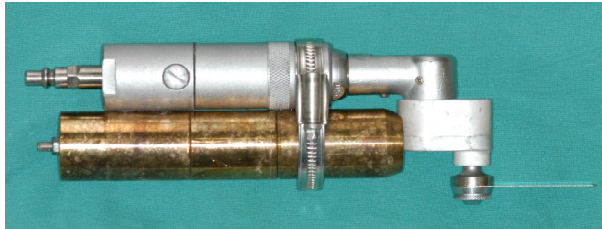


Abbildung 27: Oszillierende Säge mit montiertem 1968g Gewicht



Abbildung 28: Osteotomie intraoperativ unter Kühlung mit Kochsalzlösung

6.2 Radiologie und Makroskopie

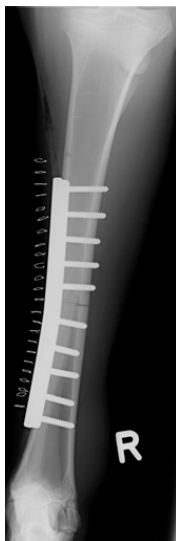


Abbildung 29: Kontrollröntgen, caudocranial, postoperationem, gute Reposition, Implantate gut platziert



Abbildung 30: Kontrollröntgen, craniocaudal, 4 Wochen postop, Osteotomiespalt noch leicht sichtbar, periostaler Kallus plattenfern deutlich erkennbar

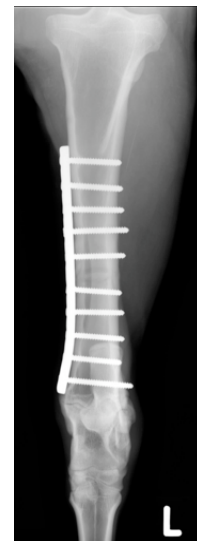


Abbildung 31: Kontrollröntgen, craniocaudal, 8 Wochen postop, Osteotomiespalt nicht mehr sichtbar, periostaler Kallus zurückgebildet



Abbildung 32: Röntgenbild, craniocaudal, postmortem, 4Wochen-Gruppe, Osteotomiespalt noch gut sichtbar, endostal und periostal Kallus vorhanden



Abbildung 33: Tibia nach Entfernung der Platte von medial, in der Mitte des Bildes ist der Osteotomiespalt und der Kallus sichtbar (4Wochen-Gruppe)



Abbildung 34: Röntgenbild, craniocaudal, postmortem, 12 Wochen-Spezialsägegruppe, Osteotomiespalt kaum mehr sichtbar, wenig periostaler Kallus vorhanden



Abbildung 35: Tibia nach Entfernung der Platte von medial. Das Periost ist an der Stelle der Osteotomie aufgeraut. Der Osteotomiespalt ist nicht mehr sichtbar.



Abbildung 36: Röntgenbild, craniocaudal, postmortem, 12 Wochen-Spezialsägegruppe, Osteotomiespalt kaum mehr sichtbar, sehr wenig periostaler Kallus vorhanden



Abbildung 37: Tibia nach Entfernung der Platte von medial. Das Periost ist an der Stelle der Osteotomie nur in einem zentrierten Bereich aufgeraut. Der Osteotomiespalt ist nicht mehr sichtbar.

6.3 Histologie

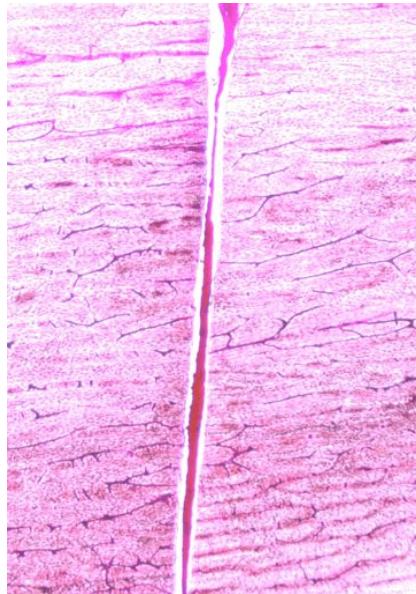


Abbildung 38: Mit Bindegewebe gefüllter Osteotomiespalt, keine Reaktion in den Fraktarenden, 4 Wochen-Gruppe (Fuchsin, 12.5 fache Vergrößerung)

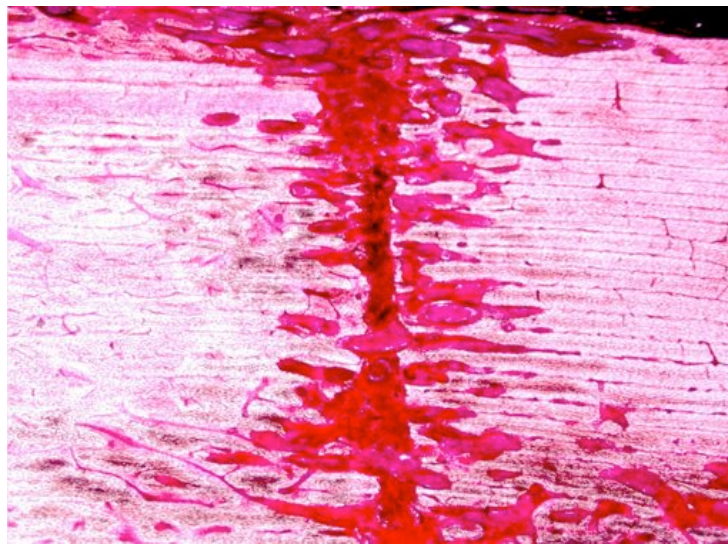


Abbildung 39: Durch Remodeling und Gap healing überbrückter Osteotomiespalt, 12 Wochen-Gruppe (Fuchsin, 12.5 fache Vergrößerung)

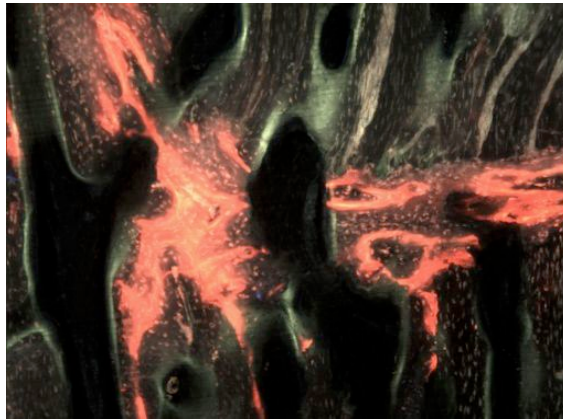


Abbildung 40: Osteotomiespalt (quer) im plattenfernen Cortex. An den Frakturende ist vor allem Xylenolorange eingebaut, weiter im Cortex auch Tetracyclin (50 fache Vergrößerung)

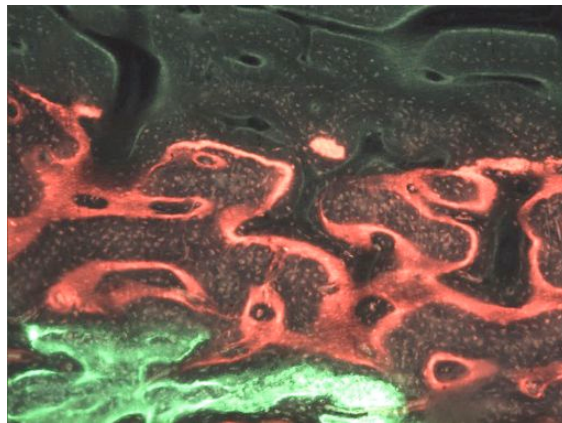


Abbildung 41: Periostaler Kallus am plattenfernen Cortex. Nahe dem Cortex Calceingrün, in der Mitte Xylenolorange, aussen Tetracyclin (50 fache Vergrößerung)

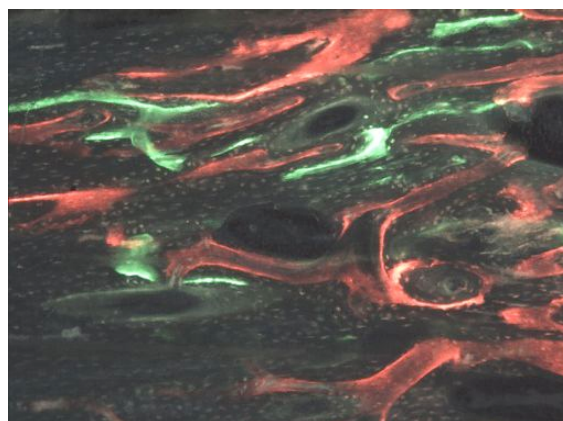


Abbildung 42: Ausschnitt nahe einem Schraubenloch. Alle 3 Farben sichtbar. Tetracyclin ringförmig und innen am Osteoid (50 fache Vergrößerung)

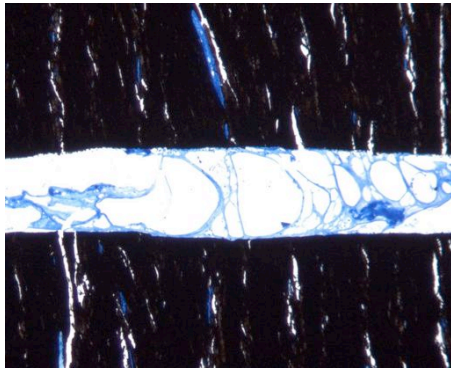


Abbildung 43: Osteotomiespalt im plattennahen Cortex bei einem Schaf der 4 Wochen-Gruppe. (von Kossa/ Mc Neal, 12.5 fache Vergrößerung)

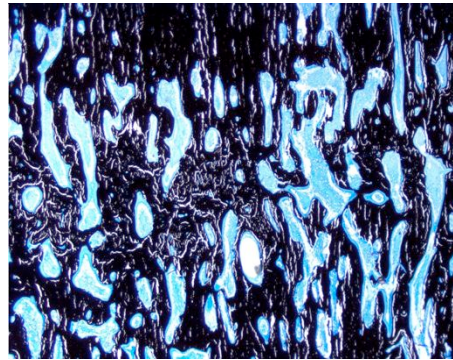


Abbildung 44: Osteotomiespalt (quer) im plattenfernen Cortex bei einem Schaf der 12 Wochen-Gruppe kaum mehr sichtbar. (von Kossa/ Mc Neal, 12.5 fache Vergrößerung)

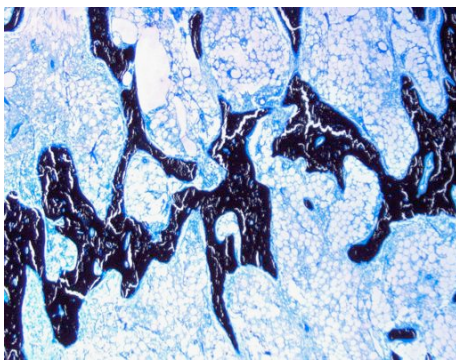


Abbildung 45: Knochenmarkhöhle im Bereich der Osteotomielinie bei einem Schaf der 12 Wochen-Gruppe. Der Kallus wird abgebaut und normales Knochenmark wird gebildet. (von Kossa/ Mc Neal, 12.5 fache Vergrößerung)

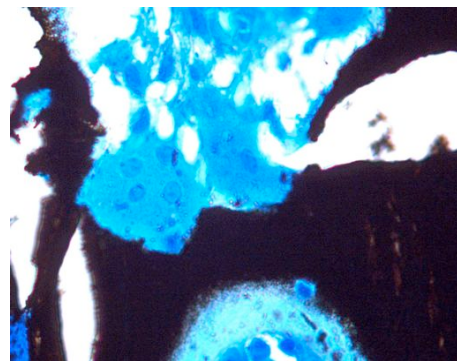


Abbildung 46: Cutting Cone mit grossem Osteoklasten, der den Osteotomiespalt (quer) überbrückt. (von Kossa/ Mc Neal, 400 fache Vergrößerung)

7 Literaturverzeichnis

1. Ark, T.W., et al., Innovations in oscillating bone saw blades. *J Long Term Eff Med Implants*, 1997. 7(3-4): p. 279-86.
2. Ark, T.W., et al., A technique for quantifying the performance of oscillating bone saw blades. *J Long Term Eff Med Implants*, 1997. 7(3-4): p. 255-70.
3. Augat, P., et al., Local tissue properties in bone healing: Influence of size and stability of the osteotomy gap. *J Orthop Res*, 1998. 16: p. 475-481.
4. Baumgart, R., et al., Indikation und Technik der Knochendurchtrennung. *Der Chirurg*, 1998. 69: p. 1188- 1196.
5. Benfu, C. and T. Xueming, Ultrastructural investigation of experimental fracture healing. Electron microscopic observation of cellular activity. *Chin Med J*, 1979. 92: p. 530-535.
6. Benington, I.C., et al., Thermal changes observed at implant sites during internal and external irrigation. *Clin. Oral Impl. Res.*, 2002. 13: p. 293-297.
7. Bolander, M., Regulation of fracture repair by growth factors. *Proc Soc Exp Biol Med*, 1992. 200: p. 165-170.
8. Bonfield, W. and C. Li, The Temperature Dependence of the Deformation of Bone. *J Biomech*, 1968. 1: p. 323-329.
9. Borque, W., M. Gross, and B. Hall, A reproducible method for producing and quantifying the stages of fracture repair. *Lab Anim Sci*, 1992. 42: p. 369-374.
10. Brighton, C., Principles of fracture healing. Part I: The biology of fracture repair. *AAOS Instr Course Lect*, 1984. 33: p. 60-82.
11. Cheal, E., et al., Role of interfragmentary strain in fracture healing: Ovine model of a healing osteotomy. *J Orthop Res*, 1991. 9: p. 131-142.
12. Claes, L., et al., Effects of mechanical factors on the fracture healing process. *Clin Orthop Relat Res*, 1998(355 Suppl): p. 132-47.
13. Claes, L., et al., Effect of dynamization on gap healing of diaphyseal fractures under external fixation. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 1995. 10(5): p. 227-234.
14. Cordey, J., S.M. Perren, and S.G. Steinemann, Stress protection due to plates: myth or reality? A parametric analysis made using the composite beam theory. *Injury*, 2000. 31 Suppl 3: p. C1-13.
15. Cornell, C. and J. Lane, Newest factors in fracture healing. *Clin Orthop*, 1992. 277: p. 297-311.
16. Danis, R., *Theorie et pratique de l'osteosynthese*. Masson & Cie, Paris, 1949.
17. Eriksson, A., Heat induced bone tissue injury. Dissertation, University of Gothenburg, 1984.
18. Eriksson, A., T. Albrektsson, and B. Albrektsson, Heat caused by drilling cortical bone. *Acta Orthop Scand*, 1984. 55: p. 629.
19. Farouk, O., et al., Minimally invasive plate osteosynthesis and vascularity: preliminary results of a cadaver injection study. *Injury*, 1997. 28 Suppl 1: p. A7-12.
20. Field, J.R., Bone Plate Fixation: Its Relationship with Implant Induced Osteoporosis. *Veterinary Comparative Orthopaedics and Traumatology*, 1997. 10: p. 88-94.
21. Firoozbakhsh, K., et al., Heat generation during ulnar osteotomy with microsagittal saw blades. *Iowa Orthop J*, 2003. 23: p. 46-50.

-
22. Fuchsberger, A., Temperatureinwirkung auf die Kompakta beim Sägen in Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen. Zent.bl. Chir., 1987. 112: p. 793-804.
 23. Fuchsberger, A., Die schädigende Temperatur bei der spanenden Knochenaarbeitung. Unfallchirurgie, 1988. 14(4): p. 173-183.
 24. Giraud, J.-Y., et al., Bone Cutting. Clin. Phys. Physiol. Meas., 1991. 12(1): p. 1-19.
 25. Haurowitz, F., Eiweissdenaturierung. Hoppe, Seyler, Thierfelder: Handbuch der physiologisch- und pathologisch- chemischen Analyse, 1966. 4(1): p. 450ff.
 26. Ivanenko, M., et al., Ablation of hard bone tissue with pulsed CO2 lasers. Medical Laser Application, 2005. 20(1): p. 13-23.
 27. Klaushofer, K. and M. Peterlik, Pathophysiology of fracture healing. Radiologe, 1994. 34: p. 709-714.
 28. Krause, W., Bone cutting: mechanical and thermal effects. Bull. Hosp. J. Dis. Orthop. Inst., 1977. 38: p. 5-7.
 29. Krause, W., et al., Temperature elevation in orthopaedic cutting operations. J Biomech, 1982. 15: p. 267.
 30. Krause, W., et al., Thermal effects of orthopaedic bone cutting. Proc. 23rd Annual Meeting, Orthopedic Research Society, Convention Center, Las Vegas, Nevada, 1977.
 31. Krause, W.R., Orthogonal Bone Cutting: Saw Design and Operating Characteristics. J of Biomechanical Engineering, 1987. 109: p. 263-270.
 32. Lanyon, L., et al., Bone deformation recorded in vivo from strain gauges attached to the human tibial shaft. Acta Orthop Scand, 1975. 46: p. 256-268.
 33. Lippuner, K., et al., Effect of animal species and age on plate-induced vascular damage in cortical bone. Arch Orthop Trauma Surg, 1992. 111: p. 78-84.
 34. Ludewig, R., Temperaturmessungen beim Knochensägen. Dissertation der Medizinischen Fakultät der Justus Liebig Universität Giessen, 1971.
 35. Matthews, L. and C. Hirsch, Temperature measured in human cortical bone when drilling. J Bone Joint Surg, 1972. 54: p. 297-308.
 36. McKibbin, B., The biology of fracture healing in long bones. J Bone Joint Surg, 1978. 60: p. 150-162.
 37. Milberg, J. and A. Fuchsberger, Optimierung der Werkzeuggeometrie oszillierender Sägen für den Einsatz in der Medizin. Zeitschrift für Orthopädie und ihre Grenzgebiete, 1987. 125: p. 430- 439.
 38. Minns, R.J., Surgical Instrument Design for the Accurate Cutting of Bone for Implant Fixation. Clinical Materials, 1992. 10: p. 207-212.
 39. Nunamaker and Perren, Cortical bone healing: Effects of implant size and mechanical application on bone healing with full weight bearing. Trans Orthop Res Soc, 1977. 2: p. 252.
 40. Nunamaker and Perren, A radiographical and histological analysis of fracture healing using prebending of compression plates. Clin Orthop, 1979. 138: p. 167-174.
 41. Nunamaker and Perren, Experimental models of fracture repair. Clin Orthop, 1998. 355: p. 56-65.
 42. Perren, S., Physical and biological aspects of fracture healing with special reference to internal fixation. Clin Orthop, 1979. 138: p. 175-196.

43. Perren, S., Evolution of the internal fixation of long bone fractures, The scientific basis of biological internal fixation: Choosing a new balance between stability and biology. J Bone Joint Surg, 2002. 84: p. 1093-1110.
44. Rahn, B., Die polychrome Fluoreszenzmarkierung des Knochenanbaus. Zeiss-Informationen, Sonderdruck, 1976. 85.
45. Remberger, K., Knochen, Vorbemerkungen. Allgemeine Pathologie und Pathologische Anatomie.
46. Schatzker, J. and M. Tile, The rationale of operative fracture care. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1987: p. 13.
47. Schenk and Willenegger, Histology of primary bone healing: Modifications and limits of recovery of gaps in relation to extent of the defect. Unfallheilkunde, 1977. 80: p. 155-160.
48. Schenk, R. and H. Willenegger, Zum histologischen Bild der sogenannten Primärheilung der Knochenkompakta nach experimentellen Osteotomien am Hund. Experientia, 1963. 19: p. 593-595.
49. Schenk, R. and H. Willenegger, Cytodynamics and histodynamics of primary bone repair. Lane JM: Fracture Healing. Churchill Livingstone, New York, 1987: p. 23.
50. Schwieger, K., et al., Abrasive Water Jet Cutting as a New Procedure for Cutting Cancellous Bone- *In Vitro* Testing in Comparison with the Oscillating Saw. J Biomed Mater Res B Appl Biomater, 2004. 15(71 (2)): p. 223-228.
51. Song Li, Shu Chien, and P.-I. Branemark, Heat Shock- induced Necrosis and Apoptosis in Osteoblasts. J of Orthopaedic Research, 1999. 17: p. 891-899.
52. Sturmer, K. and W. Schuchardt, New aspects of closed intramedullary nailing and marrow cavity reaming in animal experiments. Bone-healing, revascularisation and remodeling. Unfallheilkunde, 1980. 83: p. 433-435.
53. Tepic, S., et al., Strength recovery in fractured sheep tibia treated with a plate or an internal fixator: an experimental study with a two-year follow-up. J Orthop Trauma, 1997. 11(1): p. 14-23.
54. Tetsch, P., Development of raised temperature after osteotomies. J Oral Maxillofac Surg, 1974. 2: p. 141.
55. Toksvig-Larsen, S. and L. Ryd, Temperature elevation during knee arthroplasty. Acta Orthop Scand, 1989. 60(4): p. 439-42.
56. Toksvig-Larsen, S., L. Ryd, and A. Lindstrand, An internally cooled saw blade for bone cuts. Lower temperatures in 30 knee arthroplasties. Acta Orthop Scand, 1990. 61(4): p. 321-3.
57. Wevers, H.W., E. Espin, and T.D.V. Cooke, Orthopedic Sawblades. The Journal of Arthroplasty, 1987. 2(1): p. 43-46.
58. Wolff, J., Das Gesetz der Transformation der Knochen. Verlag von August Hirschwald, Berlin, 1892.

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über Schafe, Sägeblatt und Zeitplan	22
Tabelle 2: Daten der beiden Sägeblätter	23
Tabelle 3: Score- System Makroskopie	31
Tabelle 4: Score- System Radiologie	32
Tabelle 5: Score- System Fuchsinschnitte	34
Tabelle 6: Score- System Fluoreszenzschnitte	35
Tabelle 7: Auswertung der Histomorphometrie 4 Wochen-Gruppe	43
Tabelle 8: Auswertung der Histomorphometrie 12 Wochen-Gruppe	44

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Masse eines Sägeblattes.....	17
Abbildung 2: positiver und negativer Spanwinkel aus [2].....	17
Abbildung 3: Auswertung der Röntgenaufnahmen 4 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 4	39
Abbildung 4: Auswertung der Röntgenaufnahmen 4 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 4	39
Abbildung 5: Auswertung der Röntgenaufnahmen 12 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 4 bezüglich Sichtbarkeit des Osteotomiespaltes und Menge des periostalen Kallus	40
Abbildung 6: Auswertung der Röntgenaufnahmen 12 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 4 bezüglich Sichtbarkeit des Osteotomiespaltes und Menge des periostalen Kallus	40
Abbildung 7: Auswertung der Röntgenaufnahmen 12 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 4 bezüglich Reposition, Absprengungen, Implantate und periostalem Kallus am plattennahen Cortex.....	41
Abbildung 8: Auswertung der Röntgenaufnahmen 12 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 4 bezüglich Reposition, Absprengungen, Implantate und periostalem Kallus am plattennahen Cortex.....	41
Abbildung 9: Auswertung der Röntgenaufnahmen 12 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 4 bezüglich endostalem Kallus und Restauration der Knochenmarkhöhle	42
Abbildung 10: Auswertung der Röntgenaufnahmen 12 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 4 bezüglich endostalem Kallus und Restauration der Knochenmarkhöhle	42
Abbildung 11: Auswertung der Histomorphometrie 4 Wochen-Gruppe	43
Abbildung 12: Auswertung der Histomorphometrie 12 Wochen-Gruppe	44
Abbildung 13: Auswertung der Fuchsinschnitte 4 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 5	45
Abbildung 14: Auswertung der Fuchsinschnitte 4 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 5	45
Abbildung 15: Auswertung der Fuchsinschnitte 12 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 5	46
Abbildung 16: Auswertung der Fuchsinschnitte 12 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 5	46
Abbildung 17: Auswertung der Fuchsinschnitte 12 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 5 bezüglich Gap healing und Remodeling	47
Abbildung 18: Auswertung der Fuchsinschnitte 12 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 5 bezüglich Gap healing und Remodeling	47
Abbildung 19: Menge des Calceingrüns 4 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 6	48
Abbildung 20: Menge des Calceingrüns 4 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 6	48
Abbildung 21: Menge des Calceingrüns 12 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 6	49
Abbildung 22: Menge des Calceingrüns 12 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 6	49

Abbildung 23: Menge des Tetracyclins 12 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 6	50
Abbildung 24: Menge des Tetracyclins 12 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 6	50
Abbildung 25: Menge des Xylenoloranges 12 Wochen- Kontrollgruppe nach Tabelle 6	51
Abbildung 26: Menge des Xylenoloranges 12 Wochen- Spezialsägegruppe nach Tabelle 6	51
Abbildung 27: Oszillierende Säge mit montiertem 1968g Gewicht	64
Abbildung 28: Osteotomie intraoperativ unter Kühlung mit Kochsalzlösung	64
Abbildung 29: Kontrollröntgen, caudocranial, postoperationem, gute Reposition, Implantate gut plazierte	64
Abbildung 30: Kontrollröntgen, craniocaudal, 4 Wochen postop, Osteotomiespalt noch leicht sichtbar, periostaler Kallus plattenfern deutlich erkennbar	64
Abbildung 31: Kontrollröntgen, craniocaudal, 8 Wochen postop, Osteotomiespalt nicht mehr sichtbar, periostaler Kallus zurückgebildet	64
Abbildung 32: Röntgenbild, craniocaudal, postmortem, 4 Wochen-Gruppe, Osteotomiespalt noch gut sichtbar, endostal und periostal Kallus vorhanden	65
Abbildung 33: Tibia nach Entfernung der Platte von medial, in der Mitte des Bildes ist der Osteotomiespalt und der Kallus sichtbar (4 Wochen-Gruppe)	65
Abbildung 34: Röntgenbild, craniocaudal, postmortem, 12 Wochen- Spezialsägegruppe, Osteotomiespalt kaum mehr sichtbar, wenig periostaler Kallus vorhanden	65
Abbildung 35: Tibia nach Entfernung der Platte von medial. Das Periost ist an der Stelle der Osteotomie aufgeraut. Der Osteotomiespalt ist nicht mehr sichtbar	65
Abbildung 36: Röntgenbild, craniocaudal, postmortem, 12 Wochen- Spezialsägegruppe, Osteotomiespalt kaum mehr sichtbar, sehr wenig periostaler Kallus vorhanden	66
Abbildung 37: Tibia nach Entfernung der Platte von medial. Das Periost ist an der Stelle der Osteotomie nur in einem zentrierten Bereich aufgeraut. Der Osteotomiespalt ist nicht mehr sichtbar	66
Abbildung 38: Mit Bindegewebe gefüllter Osteotomiespalt, keine Reaktion in den Frakturenden, 4 Wochen-Gruppe (Fuchsin, 12.5 fache Vergrößerung)	67
Abbildung 39: Durch Remodeling und Gap healing überbrückter Osteotomiespalt, 12 Wochen-Gruppe (Fuchsin, 12.5 fache Vergrößerung)	67
Abbildung 40: Osteotomiespalt (quer) im plattenfernen Cortex. An den Frakturenden ist vor allem Xylenolorange eingebaut, weiter im Cortex auch Tetracyclin (50 fache Vergrößerung)	68
Abbildung 41: Periostaler Kallus am plattenfernen Cortex. Nahe dem Cortex Calceingrün, in der Mitte Xylenolorange, aussen Tetracyclin (50 fache Vergrößerung)	68
Abbildung 42: Ausschnitt nahe einem Schraubenloch. Alle 3 Farben sichtbar. Tetracyclin ringförmig und innen am Osteoid (50 fache Vergrößerung)	68

Abbildung 43: Osteotomiespalt im plattennahen Cortex bei einem Schaf der 4 Wochen-Gruppe. (von Kossa/ Mc Neal, 12.5 fache Vergrößerung)....	69
Abbildung 44: Osteotomiespalt (quer) im plattenfernen Cortex bei einem Schaf der 12 Wochen-Gruppe kaum mehr sichtbar. (von Kossa/ Mc Neal, 12.5 fache Vergrößerung)	69
Abbildung 45: Knochenmarkhöhle im Bereich der Osteotomielinie bei einem Schaf der 12 Wochen-Gruppe. Der Kallus wird abgebaut und normales Knochenmark wird gebildet. (von Kossa/ Mc Neal, 12.5 fache Vergrößerung)	69
Abbildung 46: Cutting Cone mit grossem Osteoklasten, der den Osteotomiespalt (quer) überbrückt. (von Kossa/ Mc Neal, 400 fache Vergrößerung)	69

10 Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei Frau PD Dr. med. vet. **Brigitte von Rechenberg** für die Überlassung des Themas und die exzellente fachliche und menschliche Betreuung bedanken. Sie hat sich stets für meine Arbeit und mein berufliches Weiterkommen eingesetzt.

Herrn Dr. med. **Urs Schneider** möchte ich für die Zusammenarbeit und Unterstützung in diesem Projekt bedanken.

Herrn Prof. Dr. med. Dr. med. dent. **Robert Sader** danke ich für die Korrektur der Arbeit als Korreferent.

Herrn Dr. med. Dr. med. dent. **Johannes Kuttenger**, Chefarzt der Mund-, Kiefer-, Gesichtschirurgie möchte ich für die Hilfe bei der Auswertung der Studie danken.

Frau Dr. med. vet. **Katja Nuss** danke ich für die Korrektur der Arbeit und die Mithilfe bei der Auswertung der Röntgenbilder.

Herzlichen Dank an Frau **Kati Zlinsky** und **Sabina Wunderlin** für die Einweisung und Hilfe bei der Herstellung der Histologieschnitte, und Herrn **Adrian Fairburn** für die Herstellung der Fluoreszenzmarker.

Den **Anästhesisten** des Tierspitals möchte ich für die hervorragende Anästhesie der Schafe, den **Tierpflegern** und dem Ehepaar Knüsel für die Betreuung und Fürsorge der Versuchstiere danken.

Mein ganz besonderer Dank geht an **Silvio Hochreutener**, der mich sowohl persönlich als auch computertechnisch während diesem Jahr unterstützte.

Meiner **Familie** möchte an dieser Stelle einmal für die Unterstützung auf meinem Lebensweg gedankt sein.

Zu guter Letzt sei dem ganzen **MSRU- Team**: Roland Schubotz, Ruth Fiechter, Sandra Hanes, Oliver Genot, Jens Langhoff, Inka Schlemmer, Cécile von Dörnberg, Ny Hery Andrianaly, Larry Galuppo und Sabine Koch für das freundschaftliche Arbeitsklima und die Mithilfe bei der Durchführung der Versuche zu danken.

11 Lebenslauf

Name	Alessa Romana Waibel
Geburtsdatum	09.10.1979
Geburtsort	St. Gallen
Nationalität	Schweiz
Heimatort	Bussnang TG
1986-1992	Primarschule Au/SG
1992-1994	Sekundarschule Heerbrugg
1994-1998	Kantonsschule Heerbrugg, Typus C
1998-2004	Studium der Veterinärmedizin an der Vetsuisse Fakultät Zürich mit Erteilung der Approbation als Tierärztin am 28.05.2004
2004-2005	Anfertigung der Dissertation in der Musculoskeletal Research Unit, Pferdeklinik der Vetsuisse Fakultät der Universität Zürich
seit August 2005	Assistentenstelle an der Kleintier- und Pferdeklinik Dr. Leuenberger in Staffelbach AG